

Министерство образования и науки Российской Федерации

Сыктывкарский лесной институт (филиал) федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего профессионального образования
«Санкт-Петербургский государственный
лесотехнический университет имени С. М. Кирова»

Кафедра теплотехники и гидравлики

ТЕПЛОТЕХНИКА

Сборник описаний лабораторных работ

для студентов направлений подготовки:

110302.65 «Электрификация и автоматизация сельского хозяйства»,
110301.65 «Механизация сельского хозяйства»,
190601.65 «Автомобили и автомобильное хозяйство»,
190603.65 «Сервис транспортных и технологических машин и оборудования»,
220301.65 «Автоматизация технологических процессов и производств»,
250401.65 «Лесоинженерное дело»,
250403.65 «Технология деревообработки»,
270102.65 «Промышленное и гражданское строительство»,
240406.65 «Технология химической переработки древесины»

и направлений бакалавриата:

110300.62 «Агроинженерия»,
150400.62 «Технологические машины и оборудование»,
190500.62 «Эксплуатация транспортных средств»,
220200.62 «Автоматизация и управление»,
250300.62 «Технология и оборудование лесозаготовительных и деревообрабатывающих производств»,
270100.62 «Строительство»,
110300.62 «Агроинженерия» (профиль «Электрооборудование и электротехнологии»,
190600.62 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов» (профиль «Автомобили и автомобильное хозяйство»),
190600.62 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов» (профиль «Автомобильный сервис»),
250300.62 «Технология лесозаготовительных и деревообрабатывающих производств» (профиль «Лесоинженерное дело»),
250300.62 «Технология лесозаготовительных и деревообрабатывающих производств» (профиль «Технология деревообработки»),
270800.62 «Строительство» (профиль «Промышленное и гражданское строительство»),
270800.62 «Строительство» (профиль «Автомобильные дороги»),
240100.62 «Химическая технология» (профиль «Технология и оборудование химической переработки древесины»),
140100.62 «Теплоэнергетика и теплотехника» (профиль «Промышленная теплоэнергетика»

Самостоятельное учебное электронное издание

Сыктывкар 2012

УДК 621.1
ББК 31.3
Т38

Рекомендован к изданию в электронном виде кафедрой теплотехники и гидравлики
Сыктывкарского лесного института.

Утвержден к изданию в электронном виде советом технологического факультета
Сыктывкарского лесного института.

Составители:

С. Г. Ефимова, старший преподаватель
В. Т. Чупров, старший преподаватель

Отв. редактор:

Т. Л. Леканова, кандидат химических наук, доцент,
зав. кафедрой теплотехники и гидравлики Сыктывкарского лесного института

ТЕПЛОТЕХНИКА : сборник описаний лабораторных работ : самост. учеб.
Т38 электрон. изд. / Сыкт. лесн. ин-т ; сост. С. Г. Ефимова, В. Т. Чупров. – Электрон.
дан. – Сыктывкар : СЛИ, 2012. – Режим доступа: <http://lib.sfi.komi.com>. – Загл. с
экрана.

Сборник описаний лабораторных работ (лабораторный практикум) составлен
в соответствии с Государственным образовательным стандартом высшего
профессионального образования для студентов указанных направлений
подготовки и бакалавриата.

УДК 621.1
ББК 31.3

Самостоятельное учебное электронное издание

Составители: **Ефимова** Светлана Геннадьевна, старший преподаватель,
Чупров Валентин Тимофеевич, старший преподаватель

ТЕПЛОТЕХНИКА

Электронный формат – pdf

Разрешено к публикации 28.11.12. Объем 3,3 уч.-изд. л.

Сыктывкарский лесной институт (филиал) федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский
государственный лесотехнический университет имени С. М. Кирова» (СЛИ),
167982, г. Сыктывкар, ул. Ленина, 39, institut@sfi.komi.com, www.sli.komi.com

Редакционно-издательский отдел СЛИ. Заказ № 128.

© СЛИ, 2012
© Ефимова С. Г., Чупров В. Т., составление, 2012

Оглавление

Предисловие	4
Лабораторная работа № 1. Определение коэффициента теплопроводности материалов методом бесконечной пластины	5
Лабораторная работа № 2. Определение степени черноты твердого тела	19
Лабораторная работа № 3. Определение коэффициента теплоотдачи при свободном движении воздуха около горизонтального цилиндра	29
Лабораторная работа № 4. Изучение теплопередачи в теплообменнике типа «труба в трубе»	41
Лабораторная работа № 5. Изучение процесса теплопередачи и гидравлического сопротивления в рекуперативном двухходовом теплообменном аппарате	55
Библиографический список	74

Предисловие

Целью преподавания дисциплины «Теплотехника» является обеспечение теоретической подготовки и фундаментальной базы инженеров – механиков.

Данная дисциплина составляет часть инженерной деятельности, которая включает в себя совокупность различных процессов тепло-массообмена, которые претерпевают твердые, жидкие и газообразные вещества. Учебная дисциплина «Теплотехника» изучает основные термодинамические процессы, протекающие в различных двигателях, циклы теплотехнических машин и агрегатов, их устройство, методы расчета теплообменной аппаратуры.

Изучение данной дисциплины базируется на знаниях, полученных студентами при изучении высшей математике, физике, химии и др. и предполагает проведение лекций и практических занятий, выполнение лабораторных работ.

В лаборатории «Тепло-массообменные процессы» студенты знакомятся не только с практической стороной курса, но и приобретают исследовательский опыт.

В настоящем лабораторном практикуме содержится описание пяти лабораторных работ, проводимых в лаборатории «Тепломассообменные процессы», оборудованной необходимыми установками. Лабораторные работы имеют целью выработать у студента навыки проведения экспериментальных работ, ознакомить его с методикой и способом обработки эксперимента.

Лабораторная работа № 1

4 часа

Определение коэффициента теплопроводности материалов методом бесконечной пластины

Цель работы:

- определение коэффициента теплопроводности фторопласта методом плоского слоя;
- построение зависимости коэффициента теплопроводности от температуры $\lambda = f(t)$.

Задачи работы: при различных стационарных режимах снять показание температур на поверхности испытуемого образца и записать их в таблицу. В каждом режиме определить их средние значения температур. Произвести расчет коэффициента теплопроводности для всех режимов и занести результаты в таблицу. Построить график зависимости коэффициента теплопроводности материала λ от температуры.

Обеспечивающие средства: лабораторный стенд с объектом исследования в аудитории 308 – 2.

Задание: провести четыре серии опытов, увеличивая напряжение электронагрева. Измерения следует снимать при установившемся тепловом режиме (для этого достаточно 15 мин) не менее 2-3-х раз через каждые 2 мин. Первый режим можно считать законченным, убедившись в постоянстве показаний всех термопар на протяжении нескольких измерений. Полученные результаты занести в таблицу. Рассчитать тепловой поток от нагревателя; вычислить критерии Нуссельта, Грасгофа и Прандтля; коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности теплозащитного слоя к воздуху с помощью теплового потока, отводимого свободной конвекцией и определить коэффициент теплопроводности фторопластовой пластины. Построить график зависимости коэффициента теплопроводности λ от температуры.

Требования к отчету: итоги лабораторной работы должны быть представлены на листах формата А 4, графики – на миллиметровой бумаге, выполненные в карандаше. Работа выполняется побригадно (4 чел.), бригада составляет один отчет. В отчете указывается название института, кафедры, лабораторной работы, фамилии и инициалы студентов, название специальности и группы, вида обучения, факультета, а также цель работы, схема установки, основные формулы расчетов с расшифровкой символов, подробные расчеты значений одного из режимов, таблицы «Экспериментальные данные» и «Расчетные данные», график зависимости теплопроводности λ от температуры.

Технология работы: при подаче напряжения электронагрева и выходе на стационарный режим снять показания соответствующих термопар и занести их в таблицу. Увеличив напряжения электронагрева и убедившись в стационарности режима снять показания термопар и вновь занести их в таблицу.

Контрольные вопросы:

1. Какое температурное поле называется установившимся?
2. Определение температурного градиента и теплового потока.
3. Физический смысл коэффициента теплопроводности.
4. Дифференциальное уравнение процесса теплопроводности.
5. Какова общая характеристика используемого метода определения теплопроводности?
6. С помощью, каких приборов производятся измерения при выполнении работы?
7. Какие тепловые потери учитываются работе и методика их определения?

Библиографический список приводится в конце сборника описаний лабораторных работ.

Описание лабораторной работы

Теоретическая часть

Теплопроводность – молекулярный перенос теплоты в теле, обусловленный наличием градиента температуры, что осуществляется вследствие теплового движения и энергетического взаимодействия между частицами, из которых состоит данное тело. Процесс теплопроводности непрерывно связан с распространением температуры в теле. Совокупность мгновенных значений температур во всех точках рассматриваемого пространства в данный момент времени называется *температурным градиентом* и выражается уравнением:

$$t = f(x, y, z, \tau) \quad (1.1)$$

где x, y, z – пространственные координаты точки, а τ – время.

Если температура в любой точке пространства не изменяется с течением времени, а является функцией только ее пространственных координат (x, y, z) , то такое температурное поле называется *установившимся*, или *стационарным*. Простейшим температурным полем является одномерное стационарное поле $t = f(x)$.

Все точки пространства, имеющие одинаковую температуру, образуют *изотермическую поверхность*, следовательно, изменения температур в теле может наблюдаться только в направлениях, пересекающих эту поверхность, причем наиболее сильные изменения наблюдаются в направлении нормали (рис. 1.1).

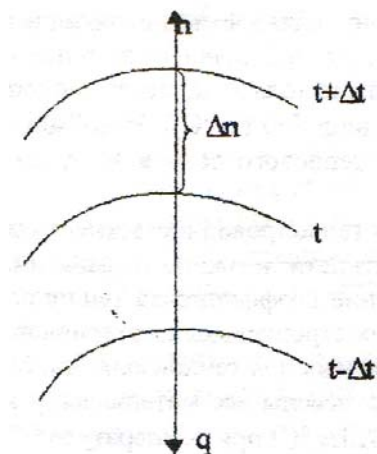


Рис. 1.1. К определению температурного градиента и теплового потока

Предел отношения изменения температуры Δt к расстоянию между изотермами по нормали Δn при условии, что $\Delta n \rightarrow 0$, называется *температурным градиентом*:

$$\lim \left[\frac{\Delta t}{\Delta n} \right]_{\Delta n \rightarrow 0} = \frac{\partial t}{\partial n} = \text{grad } t. \quad (1.2)$$

Значение температурного градиента определяет наибольшую скорость изменения температуры в данной точке температурного поля.

Количество теплоты, переданное через произвольную поверхность в единицу времени, называется *тепловым потоком* Q [Вт]. Тепловой поток, отнесенный к единице поверхности, называется *поверхностной плотностью* теплового потока q $\left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \right]$. Так как тепловая энергия самопроизвольно распространяется только в сторону убывания температуры, перемещение тепла осуществляется противоположно направлению температурного градиента:

$$\vec{q} \approx - \left(\frac{\vec{\partial t}}{\partial n} \right). \quad (1.3)$$

Согласно закону Био-Фурье, тепловая мощность, передаваемая теплопроводностью, которая в чистом виде имеет место только в твердых телах с малым коэффициентом термического расширения, выражается эмпирической уравнением:

$$\vec{q} = -\lambda \frac{\vec{\partial t}}{\partial n} = \lambda \overrightarrow{\text{grad } t} \quad (1.4)$$

Множитель пропорциональности λ , входящий в это уравнение, называется *коэффициентом теплопроводности* (или *теплопроводностью*) и численно равен плотности теплового потока вследствие теплопроводности при градиенте температуры, равном единице $\left[\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^\circ \text{C}} \right]$. Знак «минус» в уравнении (1.4) показывает, что направление теплового потока противоположно направлению градиента температуры.

Для различных тел теплопроводность имеет определенное значение и зависит от структуры, плотности, влажности, давления и температуры этих тел. Наиболее высокое значение коэффициента теплопроводности имеют металлы, ниже — у неметаллических строительных материалов и самые

низкие – у пористых материалов, применяемых в теплоизоляции. К числу теплоизоляционных материалов могут быть отнесены все материалы, у которых коэффициент теплопроводности менее $5 \left[\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^\circ \text{C}} \right]$ при температуре 0°C .

Коэффициент теплопроводности существенно зависит от температуры, и для многих материалов, в том числе и теплоизоляционных, зависимость коэффициента теплопроводности от температуры можно принять линейной:

$$\lambda_t = \lambda_0(1 + \beta t), \quad (1.5)$$

где λ_0 – коэффициент теплопроводности тела при 0°C ; β – температурный коэффициент, представляющий собой приращение коэффициента теплопроводности материала при повышении его температуры на один градус.

Для определения теплопроводности необходимо решить дифференциальное уравнение, выражающее изменение температуры в любой точке нагреваемого тела в зависимости от времени:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \nabla^2 t + \frac{q_v}{c_m \rho}, \quad (1.6)$$

где $a = \frac{\lambda}{c_m \rho}$ – температуропроводность тела, $\frac{\text{м}^2}{\text{с}}$; $\nabla^2 t = \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2}$ – оператор Лапласа q_v – объемная плотность теплового потока от внутренних источников, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^3}$; c_m – средняя удельная теплоемкость вещества, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ \text{C}}$; ρ – плотность вещества, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.

Левая часть этого уравнения характеризует скорость изменения температуры некоторой точки тела во времени, правая – пространственное распределения температуры вблизи этой точки.

Данное дифференциальное уравнение описывает процесс теплопроводности в общем виде. Чтобы получить частное решение, соответствующее конкретному явлению, к дифференциальному уравнению необходимо добавить математическое описание всех частных особенностей рассматриваемого процесса, которые включают в себя:

- геометрическую форму и размеры тела, в котором протекает процесс;
- значение физических параметров тела и окружающей среды;

- распределение температуры в теле в начальный момент времени (начальные условия) и условия протекания процесса;
- условия теплообмена на границе тела (граничные условия);
- интенсивность и распределения внутренних источников теплоты.

При решении уравнения (1.6) обычно используют метод разделения переменных или метод источника.

Лабораторные методы определения теплопроводности материалов основываются чаще всего на стационарном режиме. При исследовании теплоизоляционных материалов, обладающих низкой теплопроводностью, широкое распространение получил метод плоского слоя, когда образцу исследуемого материала придается форма тонкой круглой или квадратной пластинки. Для создания перепада температур одна поверхность пластинки нагревается, а другая охлаждается. При выборе геометрических размеров исследуемых образцов с низкой теплопроводностью необходимо выполнять условие:

$$\delta \leq \left(\frac{1}{7} \dots \frac{1}{10} \right) d \quad (1.7)$$

где δ – толщина пластины, м; d – диаметр круглой пластины (или сторона квадратной), м.

Для устранения тепловых потерь с боковых или торцевых поверхностей испытуемого образца используют тепловую изоляцию. При стационарном режиме температура в любой точке тела в течение времени не претерпевает изменений $\left(\frac{\partial t}{\partial \tau} = 0 \right)$. В лабораторной работе передача теплоты осуществляется через плоскую однородную пластину толщиной δ с $\lambda = const$. Температура наружной и внутренней поверхностей пластины поддерживается постоянной и равной соответственно t_1 и t_2 . Так как длина и ширина пластины бесконечно велика по сравнению с ее толщиной, то температура стенки изменяется только в направлении оси x .

Для определения плотности теплового потока используется уравнение (1.4) в скалярной форме:

$$q = -\lambda \frac{dt}{dx}. \quad (1.8)$$

Путем интегрирования этого уравнения определяют плотность теплового потока:

$$q = \frac{\lambda}{\delta} (t_1 - t_2). \quad (1.9)$$

С учетом площади пластины F , м^2 , коэффициент теплопроводности определяется выражением:

$$\lambda = \frac{\delta}{F} \frac{Q}{(t_1 - t_2)}. \quad (1.10)$$

Описание установки

Установка для определения коэффициента теплопроводности, рис. 1.2, состоит из лабораторного стола 1 с вертикальной панелью, на которой расположен объект исследования 2, вентиль охлаждающей воды 3, автотрансформатор с ручкой управления 4, вольтметр в комплекте с регистрируемым прибором 5, блок температуры 6, а также система тумблеров и кнопок 7 – 15 включения и управления лабораторным стендом.

Объект исследования, рис. 1.3, представляет собой два образца 1, выполненных в форме дисков толщиной $\delta = 5$ мм и диаметром $d = 135$ мм из фторопласта. Испытуемые образцы помещены между нагревателем 3 и двумя холодильниками 2. необходимая плотность контакта испытуемых образцов обеспечивается применением болтового соединения. Нагревательный диск с электрическим сопротивлением $R = 96,62$ Ом выполнен из двух латунных дисков, один из которых служит крышкой, а другой представляет собой цилиндр с нагревательным элементом 4, уложенным для электрической изоляции на поверхность листового асбеста. Для снижения радиальных тепловых потерь используется теплоизоляционный кожух 5, выполненный из асбоцемента.

При установившемся тепловом режиме выделяющаяся в нагревателе теплота (за исключением радиальных тепловых потерь) проходит через испытуемые образцы, а затем отводится охлаждающей водой, протекающей через спиральные канавки, расположенные в полости двух холодильников. Подаваемое на нагреватель напряжение регулируется автотрансформатором Т1 и измеряется комбинированным цифровым прибором Ц-4313.

Для измерения температур на деталях рабочего элемента установлены хромель-копельные термопары, рис. 1.4. Термопары В1 и В2 зачеканены по центру поверхностей холодильников, а остальные четыре термопары – В3, В4, В5, В6 – расположены на торцевых поверхностях нагревателя. Кроме того, установлены еще три термопары – В7, В8, В9 – в центре боковой поверхности изоляционного кожуха. ЭДС термопар измеряется милливольтметром МВ46-41А, шкала которого проградуирована в $^{\circ}\text{C}$.

Методика проведения работы

Вывести против часовой стрелки ручку трансформатора 4, рис. 1.2, в нулевое положение и включить тумблером 7 электропитание установки (загорается сигнальная лампочка 8). Включить питание прибора Щ-4313 с помощью тумблера 11 и установить род подаваемого напряжения тумблером 12. С помощью тумблеров 13 и 14 установить род работы. Выбрать диапазон измерений, соответствующий ожидаемому значению измеряемой величины. Подать питание на блок температур 6. Проверить температуру, показываемую термопарами. К милливольтметру 17 термопары подключаются с помощью переключателя ПТИ-М-20, ручка 16 которого выведена на панель управления. Термопар, если они исправны, регистрируют температуру окружающей среды. После этого следует открыть вентиль охлаждающей воды 3 и убедиться в перемещении поплавка в ротаметре. Затем, тумблером 9, расположенном на блоке измерения мощности, включить «нагрев» и ручкой автотрансформатора 4 плавно установить минимальное напряжение электронагрева, регистрируемое прибором Щ-4313.

Через 15 мин после включения нагрева снять показания температур не менее 2...3-х раз через каждые 2 мин. Первый режим можно считать законченным, лишь убедившись в постоянстве показаний всех термопар на протяжении нескольких измерений.

Провести измерения температур на трех других режимах, увеличение электронагрева (напряжение задается преподавателем). Измерения на этих режимах следует начинать через 15 мин. после установки соответствующего напряжения и проводить в такой последовательности, как при первом режиме. Полученные результаты занести в таблицу 1.2.

По окончании эксперимента выключить подачу напряжения на нагреватель – тумблер 10, прибор Щ-4313 – тумблер 11, электропитание – тумблер 7, а затем закрыть вентиль подачи охлаждающей воды 3.

Обработка опытных данных

Для обработки результатов используются данные, полученные при установившемся тепловом режиме. Результаты расчетов заносятся в таблицу 1.3.

Коэффициент теплопроводности материала для каждого из четырех режимов вычисляется по формуле:

$$\lambda = \frac{\frac{\delta}{F}(Q - Q_{\kappa})}{t_{\kappa} - t_x}, \quad (1.11)$$

где Q – тепловой поток от нагревателя, Вт, определяется по электрической мощности, затрачиваемой на нагревание дисков:

$$Q = \frac{U^2}{R}, \quad (1.12)$$

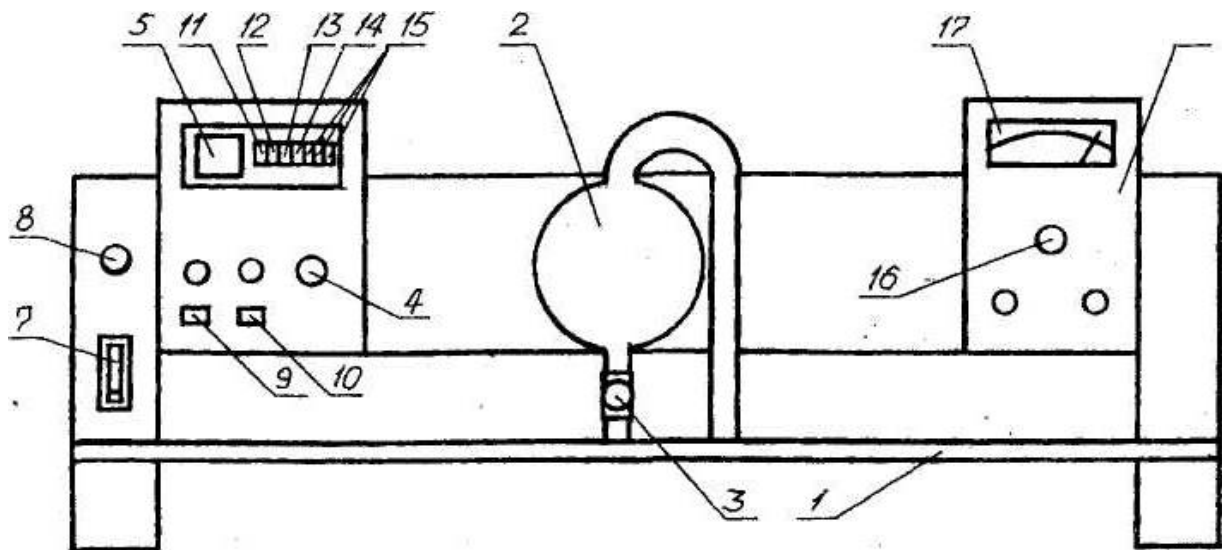


Рис.1.2. Схема установки.

1 – стол; 2 – объект исследования; 3 – вентиль; 4 – ручка автотрансформатора; 5 – вольтметр; 6 – блок температуры; 7 – тумблер электропитания; 8 – сигнальная лампа; 9 – тумблер «нагрева»; 10 – тумблер «напряжение»; 11, 12 – тумблер рода тока; 13, 14 – тумблер рода работы; 15 – кнопки выбора диапазона; 16 – переключатель термопар; 17 – шкала прибора

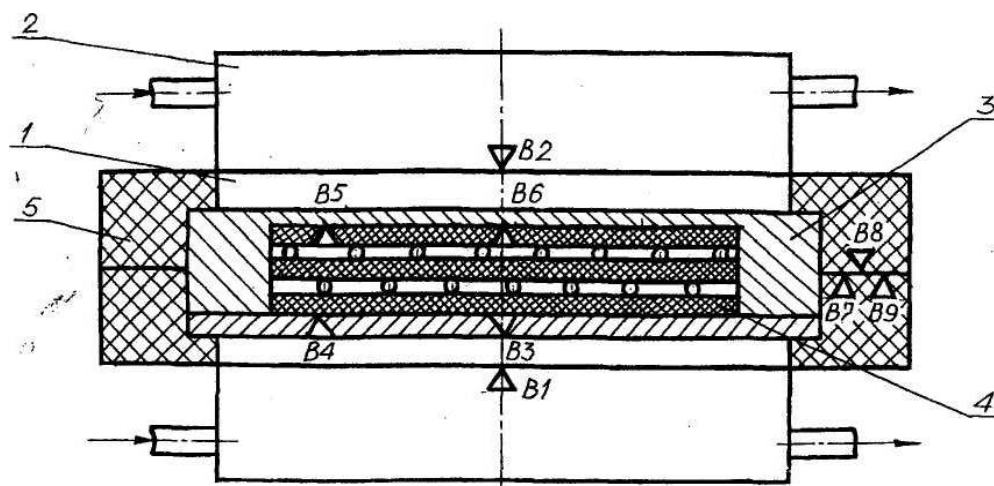


Рис. 1.3. Рабочий участок установки:
1 – образцы; 2 – холодильник; 3 – нагревательный диск; 4 – нагревательный цилиндр; 5 – теплоизоляционный кожух

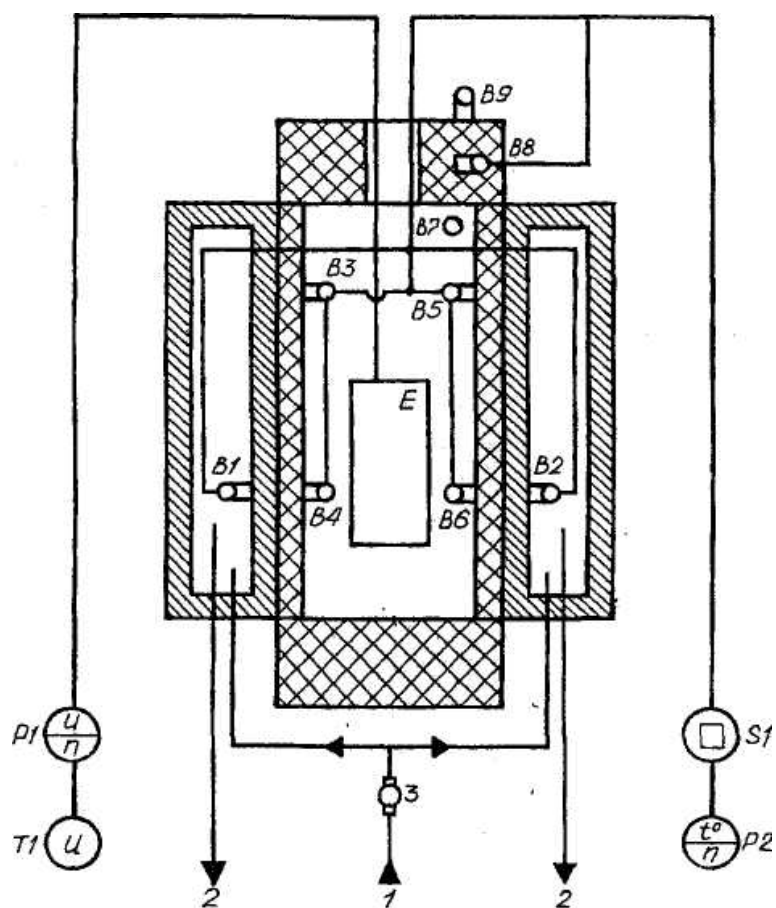


Рис. 1.4. Схема расположения термопар

где R – сопротивление нагревательного диска, Ом; U – напряжение электронагрева, В; Q_k – радиальные тепловые потери, Вт.

Средняя температура поверхности дисков со стороны нагревателя, $^{\circ}\text{C}$:

$$t_z = \sum_{i=3}^6 \frac{t_i}{4}, \quad (1.13)$$

Средняя температура поверхности дисков со стороны холодильника, $^{\circ}\text{C}$:

$$t_x = \frac{t_1 + t_2}{2}. \quad (1.14)$$

В стационарном тепловом режиме поток, который проходит в радиальном направлении внутри пластины, должен быть равен потоку, отводимому в окружающую среду с внешней поверхности теплозащитного слоя. Теплоотдача с поверхности осуществляется механизмом свободной конвекции и излучением. В данной работе при сравнительно умеренных температурах достаточно вычислить одну составляющую теплоотдачи, а именно, за счет конвекции – Q_k .

Для расчета величины Q_k используется критериальная зависимость:

$$Nu = C(Gr \cdot Pr)^n, \quad (1.15)$$

где $Nu = \frac{\alpha_k d_{\text{эк}}}{\lambda_{\text{в}}}$ – критерий Нуссельта; α_k – коэффициент теплоотдачи с внешней поверхности защитного слоя, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}}$; $d_{\text{эк}} = 0,06$ – наружный диаметр защитного слоя, м; $\lambda_{\text{в}}$ – коэффициент теплопроводности воздуха, $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^{\circ}\text{C}}$; Gr, Pr – соответственно, критерий Грасгофа и Прандтля, характеризующие данный процесс.

$$Gr = \frac{g d_{\text{эк}}^3}{\nu^2} \beta \Delta t, \quad (1.16)$$

где g – ускорение свободного падения, $\frac{\text{м}}{\text{с}^2}$; ν – коэффициент кинематической вязкости воздуха $\frac{\text{м}^2}{\text{с}}$; $\beta = (t_{\text{с}} + 273)^{-1}$ – коэффициент объемного расширения

воздуха, м; $\Delta t = t_k - t_b$ – разность температур наружной поверхности теплозащитного слоя и воздуха, $^{\circ}\text{C}$;

$$\text{Pr} = \frac{\nu}{a} = \frac{c_p \cdot \mu}{\lambda}, \quad (1.17)$$

где a – температуропроводность тела, $\frac{\text{м}^2}{\text{с}}$.

Значения коэффициентов C и n в уравнении (1.15) определяются по таблице 1.1.

Таблица 1.1

$Gr \cdot \text{Pr}$	C	n
$1 \cdot 10^{-3} \dots 5 \cdot 10^2$	1,18	1/8
$5 \cdot 10^2 \dots 2 \cdot 10^7$	0,54	1/4
$> 2 \cdot 10^7$	0,135	1/3

По рассчитанному значению критерия Нуссельта находится коэффициент теплоотдачи α_k от наружной поверхности теплозащитного слоя $F_{\text{т.с}}$ к воздуху.

Теперь можно рассчитать плотность теплового потока, отводимого свободной конвекцией по закону охлаждения:

$$Q_k = \alpha_k F_{\text{т.с}} (t_k - t_b). \quad (1.18)$$

Полученные значения коэффициента теплопроводности следует отнести к средней температуре $t_{\text{ср}}$ исследуемого диска. Определив значения λ для соответствующих температурных режимов, строят зависимость и определяют значения коэффициентов a и b .

$$\lambda = a + bt_{\text{ср}}, \quad (1.19)$$

где $t_{\text{ср}} = \frac{t_{\text{г}} + t_{\text{х}}}{2}$, $^{\circ}\text{C}$

Таблица 1.2

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

[illegible]

[illegible]

Лабораторная работа № 2
2 часа
Определение степени черноты твердого тела

Цель работы:

- определение коэффициента излучения C и степени черноты ε вольфрамовой проволоки калориметрическим методом;
- определение зависимости коэффициента излучения C от температуры нагрева вольфрамовой проволоки.

Задачи работы: при различных режимах нагрева (не менее 4-х) снять токовые характеристики исследуемого тела и температурные характеристики калориметра и занести их в таблицу экспериментальных данных. Произвести полный расчет для всех режимов, результаты записать в таблицу расчетных данных. Построить график зависимость степени черноты твердого тела ε от её температуры $\varepsilon_1 = f(T_1)$.

Обеспечивающие средства: лабораторный стенд с объектом исследования в аудитории 308 – 2, амперметр, вольтметр, электронный термометр.

Задание: изучить описание установки и методику проведения лабораторной работы. Определить степень черноты ε и коэффициент излучения C вольфрамовой проволоки. Изобразить графически зависимость ε от температуры. Написать вывод. Приложить схему установки.

Требования к отчету: итоги лабораторной работы должны быть представлены на бланках формата А 4 по определенной форме, график – на миллиметровой бумаге. Работы выполняются побригадно, бригада составляет один отчет. В отчете приводятся полный расчет значений для одного (любого) режима, а так же таблицы измеренных и рассчитанных величин и график $\varepsilon_1 = f(T_1)$.

Контрольные вопросы:

1. Излучательная способность тела. Интенсивность излучения.
2. Каков характер излучения твердых тел?
3. В чем разница между спектральной и интегральной степенью черноты тела?
4. Каким уравнением описывается лучистый тепловой поток применительно к серым телам?
5. Что называется степенью черноты тела?
6. Какие существуют методы по определению коэффициента излучения применительно к твердым телам?

7. Назовите измеряемые и расчетные величины. Как они измеряются?

Библиографический список приводится в конце сборника описаний лабораторных работ.

Описание лабораторной работы **Теоретическая часть**

Все реальные тела излучают электромагнитную энергию, которая, попадая на поверхность других твердых тел, может превращаться в тепловую (внутреннюю) энергию этих тел. В результате этого процесса может происходить изменение температуры излучающих и поглощающих тел, если количество излучаемой электромагнитной энергии тела отличается от количества поглощаемым этим телом энергии. Особенностью этого вида теплообмена – *излучения* – является то, что скорость переноса электромагнитной энергии равна скорости света ($3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$) и для распространения энергии не нужна материальная среда (или же эта среда должна быть прозрачна для излучения), а количество передаваемой теплоты между телами зависит не только от температуры тел, но и от их расположения по отношению друг к другу и от свойств поверхности (степени черноты).

Как известно, при таких видах теплообмена, как теплопроводность и конвекция, наличие материальной среды обязательно, а скорость распространения тепловых волн ограничена и не превышает $0,5 - 1,0 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

Общее количество электромагнитной энергии, излучаемой во всем диапазоне длин волн ($0 < \lambda < \infty$) с одного квадратного метра поверхности в секунду, называется *собственной интегральной излучательной способностью тела*

E_c . Размерность интегральной излучательной способности $E_c \left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \right]$ совпадает с размерностью удельного теплового потока q .

Количество электромагнитной энергии, излучаемой в бесконечно малом диапазоне длин волн ($d\lambda$) с одного квадратного метра поверхности в одну секунду, называется *собственной монохроматической (спектральной) излучательной способностью на данной длине волны* dE_c . Размерности спектральной и интегральной излучательных способностей совпадают. Собственные интегральная и спектральная излучательные способности связаны формулой:

$$E_c = \int_0^{\infty} dE_c = \int_0^{\infty} \frac{dE_c}{d\lambda} d\lambda = \int_0^{\infty} I_{\lambda} d\lambda \quad (2.1)$$

Величина $I_{\lambda} = \frac{dE_c}{d\lambda}$ называется *интенсивностью собственного излучения поверхности тела на длине волны λ* , $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^3}$.

Интенсивность собственного излучения реальных тел зависит от длины волны, абсолютной термодинамической температуры и степени черноты поверхности излучающего тела. Под *степенью черноты поверхности реального тела (ε)* понимается отношение собственной излучательной способности этого тела к собственной излучательной способности абсолютно черного тела. Степень черноты тела ε – величина безразмерная.

Различают спектральную и интегральную степень черноты поверхности тела. *Спектральная степень черноты:*

$$\varepsilon_{\lambda} = \frac{I_{\lambda}}{I_0} = \frac{dE_c}{dE_c^0}, \quad (2.2)$$

интегральная степень черноты:

$$\varepsilon = \frac{\int_0^{\infty} I_{\lambda} d\lambda}{\int_0^{\infty} I_{\lambda}^0 d\lambda} = \frac{E_c}{E_c^0}. \quad (2.3)$$

В уравнениях (2.2) и (2.3) I_{λ} , E_c – интенсивность излучения и интегральная излучательная способность реального тела; I_{λ}^0 , E_c^0 – интенсивность излучения и интегральная излучательная способность абсолютно черного тела.

Величина степени черноты лежит в пределах $0 \leq \varepsilon \leq 1$.

Абсолютно черным телом называется такое идеальное (гипотетическое) тело, которое поглощает всю падающую на его поверхность электромагнитную энергию, т. е. вся электромагнитная энергия превращается в теплоту. Следовательно, у абсолютно черного тела степень черноты равна единице ($\varepsilon = 1$).

Все реальные тела имеют степень черноты меньше единицы. Если спектральная степень черноты реального тела имеет одинаковые значения для всех длин волн, т. е. совпадает с интегральной степенью черноты, то такое реальное тело называется *серым телом*. Большинство реальных твердых тел относятся к серым телам.

Если на поверхность тела падает поток энергии электромагнитного излучения от других излучающих тел, то часть этого потока может поглощаться телом, часть отражаться и часть потока энергии пропускается через тело. В этом случае справедливо записать *закон сохранения энергии*:

$$E = E_A + E_R + E_D, \quad (2.4)$$

где E – поток падающей энергии, E_A , E_R , E_D - поглощенный, отраженный и пропущенный поток энергии.

Равенство (2.4) можно записать в виде

$$A + D + R = 1, \quad (2.5)$$

где $A = \frac{E_A}{E}$ – коэффициент поглощения энергии (поглощательная способность тела); $R = \frac{E_R}{E}$ – коэффициент отражения энергии (отражательная способность тела); $D = \frac{E_D}{E}$ коэффициент пропускания энергии (пропускательная способность тела).

Все эти коэффициенты имеют нулевую размерность и изменяются в пределах от 0 до 1.

Тела, для которых $A = 1$, $R = D = 0$, называются *абсолютно черными телами*. В случае $D = 1$, $A = R = 0$ тела называются *абсолютно прозрачными*, или *диатермическими*. Если $R = 1$, $A = D = 0$, отражение равномерно во всех направлениях, то тело называется *абсолютно белым*. Абсолютно черных, белых и прозрачных тел реально не существует. Величины A , D , R зависят от природы тела, его температуры, спектра падающего излучения и находятся опытным путем.

Большинство конструкционных материалов не пропускают падающую, на их поверхность электромагнитную энергию, т. е. для них $D = 0$ и выражение (2.5) принимает вид:

$$A + R = 1 \quad (2.6)$$

Любое реальное тело излучает собственную электромагнитную энергию, а также отражает, поглощает и пропускает падающую на его поверхность электромагнитную энергию от других тел.

Исходя из законов излучения тел, можно найти конкретные формы расчета теплообмена излучением между реальными телами, различным образом расположенными по отношению друг к другу. Если одно излучающее тело находится внутри другого, то формула расчета теплового потока между этими телами примет вид:

$$Q = \bar{\varepsilon} C_0 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] F_1, \quad (2.7)$$

где Q – результирующий тепловой поток, Вт; F_1 – площадь поверхности излучающего тела с температурой T_1 степенью черноты ε_1 , м²; C_0 – коэффициент лучеиспускания абсолютно черного тела ($C_0 = 5,67 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4}$); $\bar{\varepsilon}$ – приведенная степень черноты двух тел, находится как

$$\bar{\varepsilon} = \left[\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{F_1}{F_2} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right) \right]^{-1}, \quad (2.8)$$

где F_2 – площадь поверхности тела с температурой T_2 и степенью черноты ε_2 , м²; T_1 , T_2 – температуры первого и второго тела, К.

Если площадь поверхности одного тела много меньше площади поверхности второго тела ($F_1 \ll F_2$), то приведенная степень черноты равна степени черноты первого излучающего тела ($\bar{\varepsilon} = \varepsilon_1$). Тогда величина теплового потока между двумя такими телами может быть рассчитана по формуле

$$Q = \varepsilon_1 C_0 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] F_1, \quad (2.9)$$

Для опытного исследования коэффициента излучения применительно к твердым телам получили распространение следующие методы: радиационный, калориметрический и метод регулярного режима.

Точность измерений коэффициента излучения *радиационным методом* относительно невелика и определяется точностью измерения температур и чувствительностью приемника излучения. Чувствительность приемника должна быть особенно высока при измерении малых лучистых потоков, испускаемых поверхностями полированных металлов при низких температурах. К недостаткам радиационного метода относится неизбежная неточность наводки приемника излучения и некоторое рассеивание лучистой энергии, падающей на спай дифференциальной термопары. Кроме того, форма образца, применяемого в этом случае, должна быть плоской.

В *методе регулярного режима* отпадает необходимость в измерении, как лучистых тепловых потоков, так и температуры поверхности. Опыт сводится лишь к определению темпа охлаждения. Метод регулярного теплового режима применяется в относительном и абсолютном вариантах.

Опытные образцы при этом могут иметь произвольную геометрическую форму и малые размеры.

Калориметрический метод позволяет существенно повысить точность измерений и проводить измерения в широком интервале изменений температур. Такой метод дает возможность получить данные по коэффициентам излучения для полного полусферического излучения, что практически более важно. В калориметрическом методе нельзя применять образцы произвольной формы, форма должна допускать возможность закладки в них электрических нагревателей. При этом необходимо, чтобы утечки тепла, обусловленные концевыми потерями в образцах, были пренебрежимо малы.

Калориметрический метод является абсолютным методом. В нем лучистый тепловой поток определяется по измерению количества тепла, непосредственно отдаваемого излучаемым телом.

Описание установки

Схема установки, рис. 2.1, состоит из лабораторного стола 1 с вертикальной панелью, на которой помещен блок излучателя 2, вентиль охлаждающей воды 3, панель управления 4. На панели управления установлены тумблер 5 электропитания установки и сигнальная лампочка 6, тумблер включения нагрева 7, регулятор мощности накала образца 8.

Рабочий участок, рис. 2.2, установки представляет собой стеклянный калориметр 1, выполненный с двойными стенками для охлаждения его проточкой водой. Исследуемое тело - вольфрамовая проволока 2 длиной $l = 200$ мм и диаметром $d = 0,34$ мм, впаянная в калориметр, из которого откачан воздух. Проволока нагревается путем пропускания через нее электрического тока.

Поверхность исследуемого тела может передавать тепло не только излучением, но еще и путем конвекции и теплопроводности. Однако при давлении порядка 10^{-5} мм рт. ст. передача тепла конвекцией и теплопроводностью пренебрежимо мала, и ее можно не учитывать в расчетах. Поэтому из внутренней полости калориметра, в котором помещена вольфрамовая проволока, воздух откачан до указанного остаточного давления.

Температура воды на входе и выходе калориметра измеряется мультиметром М-838. Для определения силы тока на рабочем участке вольфрамовой проволоки, задаваемой регулятором нагрева, в схему включен шунт, падение напряжения на котором через преобразователь подается на миллиамперметр М109.

Падение напряжения на рабочем участке проволоки измеряется непосредственно вольтметром М42173. Электропитание лабораторной

установки осуществляется от сети переменного тока напряжением 220 В и частотой 50 Гц.

Методика проведения работы

Открыв вентиль 3, рис. 2.1, заполнить оболочку калориметра охлаждающей водой. Вывести регулятор мощности накала образца 8 против часовой стрелки до упора и включить установку в сеть тумблером 5 (загорается контрольная лампочка 6), после чего включить нагрев проволоки переключателем 7 и регулятором 8 установить падение напряжения в диапазоне $\Delta U = 6,5 - 7,0$ В для первого режима. Через 2-3 минуты после установления стационарного режима, который характеризуется постоянством показаний во времени измеряемых величин, измерить вольтметром 10 падение напряжения. Измерить также силу тока с помощью амперметра 11 и температуру воды на выходе и входе из калориметра мультиметром 9, переключая соответствующие штуцера. Все величины заносятся в отчетную таблицу 2.1. Провести указанные измерения еще на трех режимах, соответствующих падению напряжения на рабочем участке (четвертый режим) $\Delta U = 8 - 10$ В. По окончании измерений вывести регулятор нагрева 8 против часовой стрелки до упора и выключить переключателем 7 нагрев проволоки. Затем отключить электропитание установки и перекрыть подачу воды.

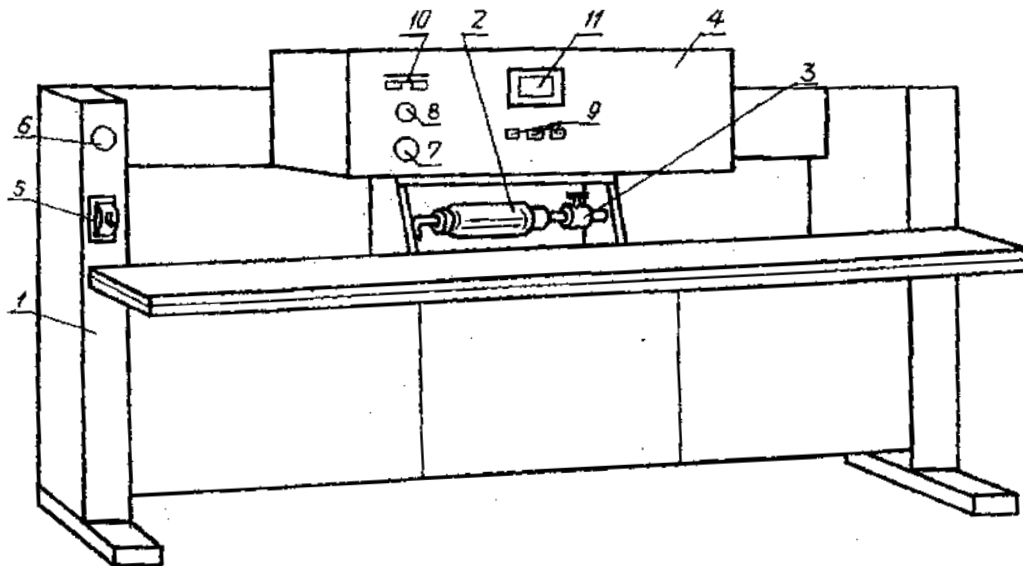


Рис. 2.1. Схема установки:

- 1 – стол; 2 – блок излучения; 3 – вентиль; 4 – панель управления;
 5 – тумблер электропитания; 6 – сигнальная лампочка; 7 – тумблер нагрева;
 8 – регулятор накала; 9 – переключатель рода измерений;
 10 – переключатель термопар; 11 – измерительный прибор

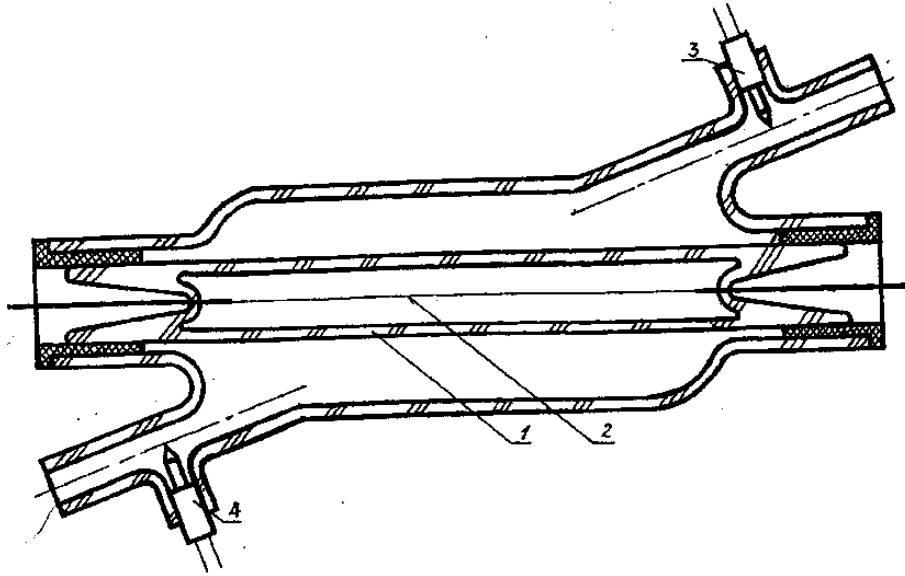


Рис. 2.2. Рабочий участок:

1 – стеклянный калориметр; 2 – вольфрамовая проволока; 3, 4 – термопары

Обработка опытных данных

Для обработки результатов измерений используют данные, полученные при установившемся тепловом режиме системы. Полученные результаты заносятся в таблицу 2.2.

Расчет значений коэффициента излучения проволоки производится в такой последовательности: определяют электрическое сопротивление исследуемой проволоки R (Ом) по формуле:

$$R = \frac{\Delta U}{I}, \quad (2.10)$$

где ΔU – падение напряжения, В; I – величина силы тока, А.

Находят абсолютное значение температуры поверхности проволоки T_1 , используя градуировочную зависимость электрического сопротивления проволоки от температуры, рис.2.3.

Вычисляют абсолютную температуру оболочки калориметра T_2 , которая может быть принята равной средней температуре охлаждающей калориметр воды:

$$T_2 = \frac{t_{\text{вх}} + t_{\text{вых}}}{2} + 273, \quad (2.11)$$

где $t_{\text{вх}}$, $t_{\text{вых}}$ – температура воды на входе и выходе из калориметра, соответственно, $^{\circ}\text{C}$.

Результирующий поток излучения рассчитывают по уравнению:

$$Q = I \Delta U. \quad (2.12)$$

После чего, значения коэффициента лучеиспускания $C_1 = \varepsilon C_0$ рассчитывают по формуле (2.9), где площадь излучающей поверхности вольфрамовой проволоки $F_1 = \pi d l$.

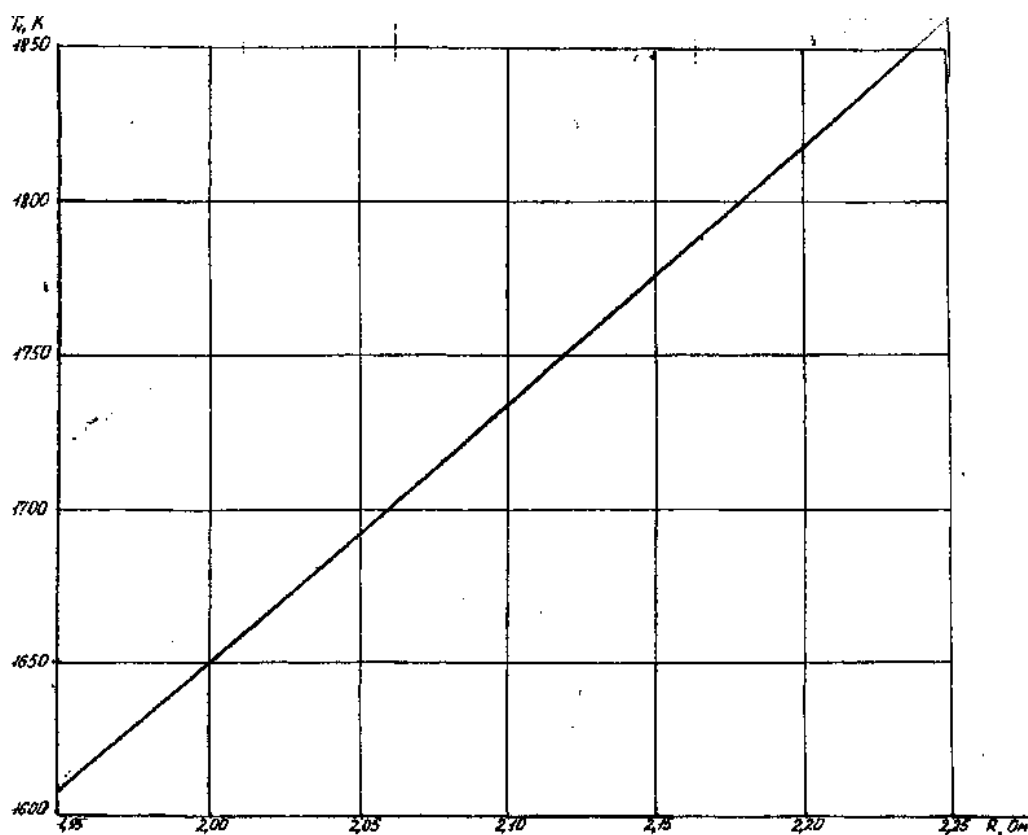


Рис. 2.3. Градуировочная зависимость электрического сопротивления проволоки от температуры

Степень черноты ε_1 поверхности проволоки вычисляют из выражения:

$$\varepsilon_1 = \frac{C_1}{5,67}. \quad (2.13)$$

После определения значений степени черноты вольфрамовой проволоки строят графическую зависимость $\varepsilon_1 = f(T_1)$.

Таблица 2.1

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

№	Сила тока, I, A	Падение напряжения, $\Delta U, B$	Температура воды на входе, $t_{\text{вх}}, ^\circ C$	Температура воды на выходе $t_{\text{вых}}, ^\circ C$
1				
2				
3				
·				
·				

Таблица 2.2

РАСЧЕТНЫЕ ДАННЫЕ

№	Сопротивление проволоки, $R, \text{Ом}$	Температура проволоки, T_1, K	Температура калориметра, T_2, K	Тепловой поток, $Q, \text{Вт}$	Коэффициент излучения проволоки, $C_1, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{K}^4}$	Степень черноты проволоки, ε_1
1						
2						
3						
·						
·						

Лабораторная работа № 3

4 часа

Определение коэффициента теплоотдачи при свободном движении воздуха около горизонтального цилиндра

Цель работы:

- экспериментальное определение коэффициента теплоотдачи α при свободном движении воздуха около горизонтального цилиндра;
- построение графика зависимости критерия Nu от критериев $(Gr \cdot Pr)$ и определение констант C и n в критериальном уравнении теплообмена.

Задачи работы: при различных режимах нагрева (не менее 4-х) в пределах снять показания термопар на поверхности горизонтального цилиндра и занести их в таблицу экспериментальных данных. Найти расчетные величины для всех режимов и занести результаты в таблицу расчетных данных. Решить критериальное уравнение теплообмена $Nu = C(Gr \cdot Pr)^n$ с определением констант C и n . Построить график зависимости критерия Nu от критериев $(Gr \cdot Pr)$.

Обеспечивающие средства: лабораторный стенд с объектом исследования в аудитории 308 – 2.

Задание: провести четыре серии опытов, увеличивая напряжение электронагрева. Измерения следует снимать при установившемся тепловом режиме (для этого достаточно 15 мин) не менее 2-3-х раз через каждые 2 мин. Первый режим можно считать законченным, убедившись в постоянстве показаний всех термопар на протяжении нескольких измерений. Полученные результаты занести в таблицу. Рассчитать тепловой поток от нагревателя (горизонтальный цилиндр) к потоку воздуха и определить коэффициент теплоотдачи α . Вычислить критерии теплового подобия: числа Nu , Pr , Gr ; построить в логарифмических осях уравнения зависимостей $\lg Nu = f(\lg Gr \cdot Pr)$ и установить величины опытных коэффициентов C и n .

Требования к отчету: итоги лабораторной работы должны быть представлены на бланках формата А 4 по определенной форме, графики на миллиметровой бумаге. Работы выполняются по бригадно, бригада составляет один отчет. В отчете приводится полный расчет значений для одного (любого) режима. А так же таблицы измеренных и расчетных величин и график $\lg Nu = f(\lg Gr \cdot Pr)$. Записать вывод. Приложить схему установки.

Технология работы: при подаче напряжения электронагрева и выходе на стационарный режим снять показания соответствующих термопар и занести их в таблицу. Увеличив напряжения электронагрева и убедившись в

стационарности режима снять показания термопар и вновь занести их в таблицу.

Контрольные вопросы:

1. Что является движущей силой конвективного теплообмена?
2. Какой физический смысл имеет коэффициент теплоотдачи и от чего он зависит?
3. Почему для определения коэффициента теплоотдачи применяют теорию подобия?
4. Какие числа подобия получают из дифференциальных уравнений конвективного теплообмена?
5. Как определяется режим движения теплоносителя в условиях свободной конвекции?
6. Какова методика определения коэффициента теплоотдачи?
7. Как определяются опытные коэффициенты в критериальном уравнении?

Библиографический список приводится в конце сборника описаний лабораторных работ.

Описание лабораторной работы ***Теоретическая часть***

Среди различных видов переноса теплоты (теплопроводность, конвекция, излучение), которые в большинстве случаев осуществляются одновременно, конвективный перенос во многих случаях имеет решающее значение.

При расчетах элементов теплового оборудования под *конвекцией* понимают теплообмен между поверхностью какого-либо тела и движущимся около этой поверхности теплоносителем (жидкостью или газом).

Конвективный теплообмен обусловлен совместным действием конвективного и молекулярного переноса теплоты (теплопроводности) и поэтому зависит от большого числа факторов:

- природы возникновения движения среды вдоль твердой поверхности. Различают свободное движение, обусловленное градиентом плотности слоев движущейся среды и поверхности твердого тела, и вынужденное движение, т. е. движение, вызванное действием внешних сил;

- режима движения среды. Различают ламинарный и турбулентный режимы движения. При ламинарном режиме характер течения спокойный, слоистый, без перемешивания. При турбулентном режиме движение неупорядоченное, вихревое, этот режим характеризуется непостоянством скорости движения частиц в рассматриваемой точке пространства;

- физических свойств среды;
- формы, размеров и состояния омываемой поверхности.

Теплообмен при свободном движении теплоносителя имеет большое значение во многих отраслях техники (при расчетах тепловых потерь трубопроводами и аппаратами, обмуровкой котлов и печей, отопительных и нагревательных приборов, при определении теплоотдачи строительных сооружений и т. п.).

Конвективный тепловой поток от нагретой поверхности в окружающую среду определяется по уравнению Ньютона-Рихмана (закон охлаждения):

$$Q_k = \alpha F(t_n - t_c) \quad (3.1)$$

где Q_k – мощность теплового потока, переданного конвекцией, Вт; F – поверхность теплообмена, m^2 ; t_n – температура поверхности тела, $^{\circ}C$; t_c – температура окружающей среды, $^{\circ}C$; α – коэффициент теплоотдачи, $\frac{Вт}{m^2 \cdot ^{\circ}C}$.

Коэффициент теплоотдачи α определяет интенсивность конвективного теплообмена и представляет собой мощность теплового потока, проходящего через единицу поверхности ($1m^2$) при разности температур между поверхностью и средой в 1 градус. Величина α зависит от множества переменных:

$$\alpha = f(c_p, \mu, \rho, \lambda, w, \beta, t_n, t_c, \Delta t, \dots). \quad (3.2)$$

Таким образом, расчет мощности теплового потока, переданного конвекцией, сводится к определению коэффициента теплоотдачи α .

Совокупность тепловых и гидродинамических явлений, определяющих процесс теплоотдачи, описывается системой дифференциальных уравнений.

Рассмотрим физическую картину свободной конвекции воздуха около горизонтального цилиндра, рис. 3.1, для стационарного режима. Стационарный режим характеризуется постоянством температуры и скорости во всех точках рассматриваемого пространства в течение заданного времени. Выделенный элементарный объем воздуха ($dV = dx \cdot dy \cdot dz$) равномерно двигается вверх вследствие того, что в результате нагрева уменьшается его плотность. Архимедова подъемная сила уравновешивается силой вязкостного трения. В этом случае уравнение движения записывается в виде:

$$\rho g \beta (t_n - t_c) = \mu \frac{\partial^2 w_z}{\partial z^2}, \quad (3.3)$$

где ρ – плотность воздуха, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$; β – коэффициент объемного расширения воздуха, K^{-1} : $\beta = \frac{1}{273+t_c}$; g – ускорение свободного падения, $\frac{\text{м}}{\text{с}^2}$; μ – динамический коэффициент вязкости воздуха, $\text{Па} \cdot \text{с}$; w_z – скорость движения воздуха в направлении оси z , $\frac{\text{м}}{\text{с}}$.

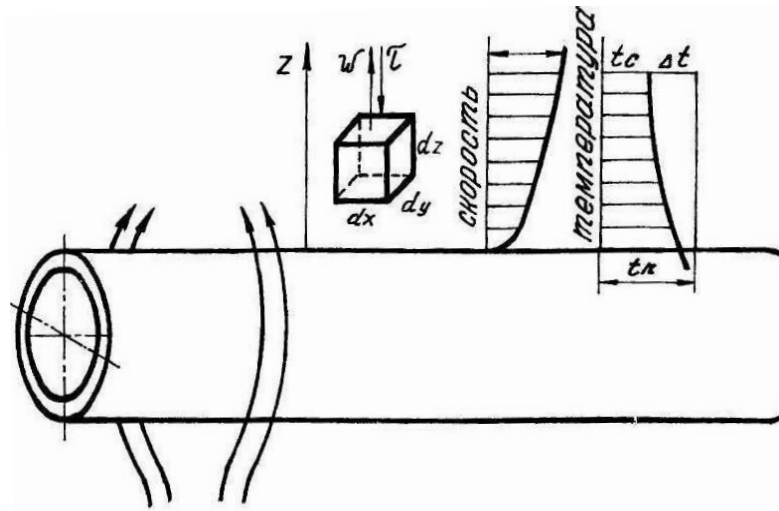


Рис. 3.1. Сводная конвекция воздуха у горизонтальной трубы

Распределение температуры внутри поднимающегося воздуха может быть выражено уравнением энергии:

$$w_z \frac{\partial t}{\partial z} = \frac{\lambda}{c_p \rho} \cdot \frac{\partial^2 t}{\partial z^2}; \quad (3.4)$$

где λ – коэффициент теплопроводности воздуха, $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^\circ \text{C}}$; c_p – теплоемкость воздуха, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ \text{C}}$.

При взаимодействии твердого тела со средой вся отводимая от поверхности теплота путем теплопроводности передается среде, и уравнение теплообмена запишется выражением

$$\alpha(t_n - t_c) = -\lambda \frac{\partial t}{\partial z} \quad (3.5)$$

При решении конкретных задач конвективного теплообмена к системе указанных дифференциальных уравнений необходимо добавить математическое описание всех частных особенностей рассматриваемой задачи, что делает аналитическое решение практически невозможным.

Можно определить α экспериментально, но в этом случае решение системы дифференциальных уравнений будет справедливо только для одного конкретного сочетания вышеуказанного множества параметров.

В таких случаях наилучшее решение дает эксперимент с обработкой его результатов в критериальном виде согласно теории подобия. *Теория подобия* - это учение о методах научного обобщения данных эксперимента и распространение их на множество подобных явлений, т. е. теория подобия позволяет распространить результаты одного опыта на случаи теплообмена геометрически подобных тел при условии равенства определяющих критериев подобия. Таким образом, основное назначение вышеприведенных дифференциальных уравнений состоит в том, что они позволяют установить вид критериев подобия. *Критерии подобия* с физической точки зрения выражают соотношения между различными физическими эффектами, характеризующими данное явление.

К критериям подобия относятся:

$Nu = \frac{\alpha d}{\lambda}$ – критерий подобия явлений теплоотдачи (число Нуссельта);

$Pr = \frac{c_p \mu}{\lambda}$ – критерий, учитывающий влияние физических свойств движущейся среды (число Прандтля);

$Gr = \frac{g d^3}{\nu^2} \beta \Delta t$ – критерий подобия аэродинамических сил (число Грасгофа),

где d – диаметр трубы, м; ν – коэффициент кинематической вязкости среды, $\frac{м}{с^2}$; Δt – температурный напор (разность температуры поверхности и среды), $^{\circ}C$.

В общем случае свободного конвективного теплообмена критериальная зависимость имеет вид:

$$Nu = \varphi(Gr \cdot Pr). \quad (3.6)$$

Произведение $(Gr \cdot Pr)$ характеризует режим движения теплоносителя.

Связь между критериями представляется обычно в виде степенной функции. Теория подобия описывает теплоотдачу от горизонтальных труб при свободном движении воздуха следующим уравнением:

$$Nu = C(Gr \cdot Pr)^n. \quad (3.7)$$

Коэффициент C и показатель степени n определяют по данным серии опытов при различных значениях температурного напора Δt .

Логарифмируя уравнение (3.7), получим выражение

$$\lg Nu = \lg C + n \lg(Gr \cdot Pr) \quad (3.8)$$

график которого представляет собой прямую линию.

Описание установки

Установка предназначена для изучения явления теплоотдачи при естественной конвекции около горизонтального цилиндра. Работа основана на измерении количества тепла Q , передаваемого поверхностью F нагретой теплообменной трубки (горизонтального цилиндра) в окружающую среду, измерении разности температур Δt между поверхностью трубки и окружающей средой с последующим вычислением коэффициента теплоотдачи α .

Схема установки, рис. 3.2, состоит из лабораторного стола 1 с вертикальной панелью, на котором в горизонтальном положении крепится объект исследования 2, представляющий собой тонкостенную трубу, изготовленную из нержавеющей стали с наружным диаметром 25 мм и длиной 860 мм.

Для измерения температуры наружной поверхности трубы равномерно по всей длине ее расположены 12 термопар марки ТХК с угловым сдвигом 60° , рис. 3.3. Холодные спаи всех термопар выведены на переключатель термопар 14. Труба нагревается током низкого напряжения. Электропитание подводится через латунные зажимы, установленные на концах трубы. Торцы нагревательной трубы теплоизолированы, электрическое сопротивление испытуемой трубы составляет $R = 0,0142$ Ом. Падение напряжения на рабочем участке регулируется лабораторным автотрансформатором Т1 и измеряется комбинированным прибором Щ-4313. ТермоЭДС термопар измеряется милливольтметром МВУ-41А, отградуированным в $^\circ\text{C}$ и соединенным с термопарами через переключатель S1. Милливольтметр снабжен автоматическим устройством КТ-3 для автоматической компенсации изменения термоЭДС, вызываемой отклонениями температуры от градуировочной.

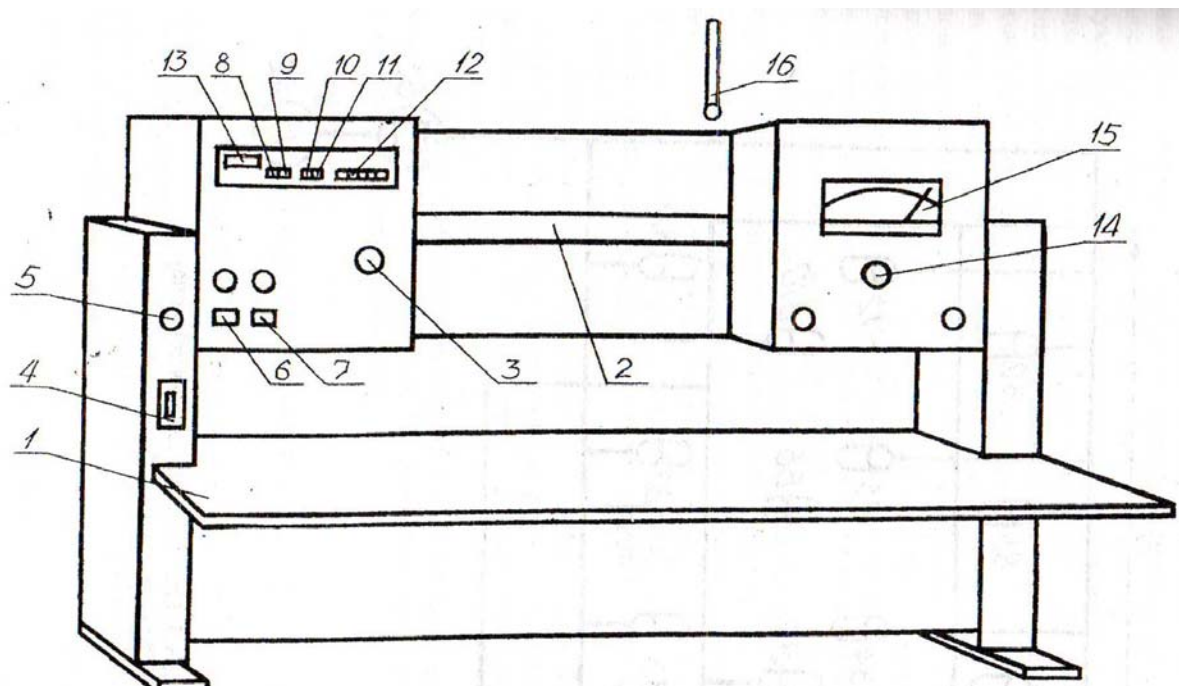


Рис. 3.2. Схема установки:

- 1 – стол; 2 – объект исследования; 3 – ручка автотрансформатора;
 4 – тумблер электропитания; 5 – сигнальная лампочка; 6 – тумблер
 «нагрев»; 7 – тумблер «напряжение»; 8, 9 – тумблер «род тока»;
 10, 11 – тумблер «род тока»; 12 – кнопки выбора диапазона измерений;
 13 – вольтметр; 14 – переключатель термопар; 15 – шкала прибора;
 16 – термометр

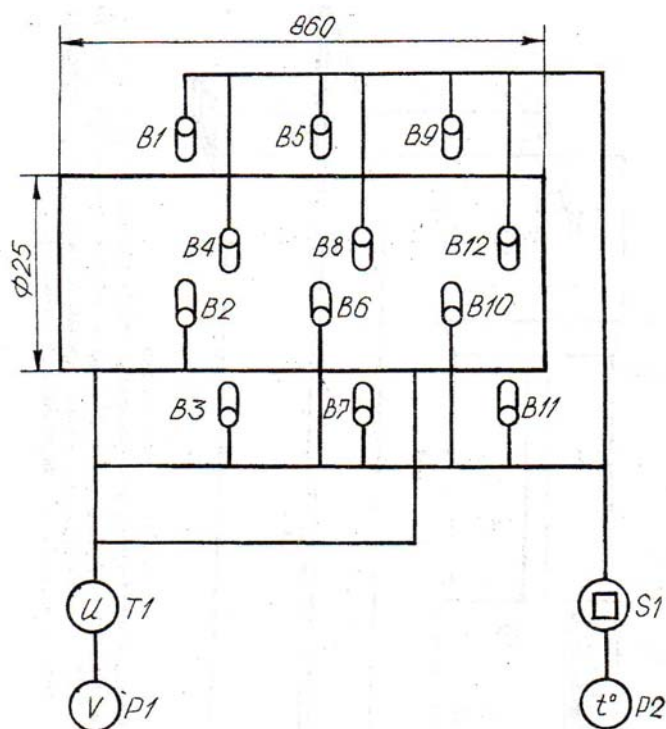


Рис. 3.3. Схема расположения термопар

Методика проведения работы

Вывести против часовой стрелки ручку автотрансформатора 3 в нулевое положение и включить тумблером 4 электропитание установки (загорается сигнальная лампочка 5). Тумблером 6, расположенным на блоке измерения мощности, включить "НАГРЕВ". Включить питание прибора Щ-4313 с помощью тумблера 8 и тумблером 9 установить род подаваемого напряжения. С помощью тумблеров 10 и 11 установить род работы. Выбрать диапазон измерений, соответствующий ожидаемому значению измеряемой величины, а если оно неизвестно - наибольший диапазон измерений (для выбора диапазона измерений на лицевой панели имеются соответствующие кнопки переключателя 12). С помощью ручки автотрансформатора 3 установить по вольтметру 13 падение напряжения на рабочем участке, равное 0,5...0,6 В, и через 10–15 мин, когда установится стационарный тепловой режим, провести измерения температур всех термопар с помощью переключателя 14 и показаний соответствующих значений термопар по шкале прибора 15.

Для перехода на новый тепловой режим надо изменить расход электроэнергии при помощи ручки автотрансформатора 3, выждать наступление установившегося режима и снова произвести измерения температур. Для выполнения работы в полном объеме необходимо провести опыты при четырех различных режимах ($U = 0,5...1,0$ В). Температура окружающего воздуха измеряется вдали от испытуемой трубы с помощью ртутного термометра 16. Результаты опытов заносятся в таблицу 3.1.

По окончании работы выключить тумблер подачи напряжения 7 на рабочем участке и вывести ручку автотрансформатора 3 в нулевое положение, а затем выключить прибор Щ-4313, отключить блок температур и подачу электропитания на установку.

Во время проведения эксперимента необходимо исключить возможное движение воздуха в лаборатории. Не рекомендуется ходить по лаборатории, окна и двери держать закрытыми и т. д.

Обработка опытных данных

Для обработки результатов можно использовать лишь данные, полученные при установившемся тепловом режиме системы.

Коэффициент теплоотдачи α вычисляется по уравнению 3.1. Количество тепла, передаваемое от наружной поверхности трубы путем конвекции, определяется из равенства:

$$Q_k = Q - Q_{\text{л}}, \quad (3.9)$$

где Q – результирующий тепловой поток, равный при стационарном режиме мощности нагревателя, Вт:

$$Q = \frac{\Delta U^2}{R} \quad (3.10)$$

где ΔU – падение напряжения на рабочем участке, В; R – электрическое сопротивление рабочего участка, Ом.

Количество тепла $Q_{\text{л}}$, Вт, передаваемое путем теплового излучения, определяется по уравнению Стефана-Больцмана:

$$Q_{\text{л}} = C_{\text{пр}} \left[\left(\frac{T_{\text{п}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{с}}}{100} \right)^4 \right] F, \quad (3.11)$$

где $C_{\text{пр}}$ – приведенный коэффициент излучения системы тел, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4}$, $T_{\text{с}}$, $T_{\text{п}}$ – абсолютные температуры окружающей среды и поверхности трубы, соответственно, К.

Так как поверхность окружающих тел во много раз больше, чем поверхность опытной трубы, то можно принять, что приведенный коэффициент излучения равен коэффициенту излучения трубы $C_{\text{пр}} = C$.

Для нагревательной трубы, выполненной из нержавеющей стали, можно принять $C = 0,6 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4}$.

В качестве расчетной температуры опытной трубы принимается средняя арифметическая величина из измерений в 10 точках. Показания крайних термопар 1 и 12 при усреднении температуры поверхности цилиндра не учитываются.

Параметры воздуха, входящие в критерии подобия, находятся при средней температуре пограничного слоя

$$t_{\text{п.сл}} = \frac{t_{\text{п}} + t_{\text{с}}}{2} \quad (3.12)$$

и для обработки опытных результатов в критериальном виде выбираются из таблицы 3.3.

После определения физических параметров воздуха вычисляются критерии Nu , Gr , Pr .

Полученные значения критериев наносятся на график в логарифмических координатах в виде зависимости (3.8), и через точки (метод наименьших квадратов) проводят прямую. Это уравнение прямой линии в

логарифмических координатах, где по оси абсцисс отложены значения $\lg(Gr \cdot Pr)$, а по оси ординат $\lg Nu$. В результате построения логарифмической зависимости определяют коэффициенты C и n , где постоянная n определяется тангенсом угла наклона прямой к оси абсцисс, а постоянная C находится из соотношения для любой точки прямой

$$C = \frac{Nu}{(Gr \cdot Pr)^n}.$$

Уравнение (3.7) справедливо для подобных явлений в интервале измеренных значений произведений $Gr \cdot Pr$.

Результаты расчетов заносят в таблицу 3.2.

Таблица 3.1

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

[illegible]

Таблица 3.2

РАСЧЕТНЫЕ ДАННЫЕ

[illegible]

Таблица 3.3

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СУХОГО ВОЗДУХА ПРИ АТМОСФЕРНОМ ДАВЛЕНИИ

Температура t , °C	Плотность, ρ , $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	Теплоемкость, c_p , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$	Теплопроводность, $\lambda \cdot 10^2$, $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^\circ\text{C}}$	Динамическая вязкость, $\mu \cdot 10^6$, Па·с	Кинематическая вязкость, $\nu \cdot 10^6$, $\frac{\text{м}^2}{\text{с}}$	Критерий Прандтля, Pr
0	1,293	1,005	2,44	17,2	13,28	0,707
10	1,247	1,005	2,51	17,6	14,16	0,705
20	1,205	1,005	2,59	18,1	15,06	0,703
30	1,165	1,005	2,67	18,6	16,00	0,701
40	1,128	1,005	2,76	19,1	16,96	0,699
50	1,093	1,005	2,83	19,6	17,95	0,698
60	1,060	1,005	2,90	20,1	18,97	0,696
70	1,029	1,009	2,96	20,6	20,02	0,694
80	1,000	1,009	3,05	21,2	21,09	0,692
90	0,972	1,009	3,13	21,5	22,10	0,690
100	0,946	1,009	3,21	21,9	23,13	0,688

Лабораторная работа № 4

4 часа

Изучение теплопередачи в теплообменнике типа «труба в трубе»

Цель работы:

- практическое ознакомление с работой теплообменного аппарата;
- экспериментальное определение коэффициента теплопередачи $K_{оп}$ от нагретого теплоносителя к холодному и сравнение опытного значения с расчетным K_p с построением корреляционного графика.

Задачи работы:

Рассчитать величину коэффициента теплопередачи $K_{оп}$ (при 4-х режимах теплового потока) как при прямоточной так и при противоточной схемах движения теплоносителей. Определить расчетный коэффициент теплопередачи K_p в этих же режимах движения теплоносителя. Построить корреляционные графики $K_{оп}$ и K_p при прямоточной схеме и противоточной схеме движения теплоносителей и сделать соответствующие выводы.

Обеспечивающие средства: лабораторный стенд теплообменник типа «труба в трубе» в аудитории 10–2 в составе:

- теплообменник «труба в трубе» с запорно-регулируемой арматурой;
- циркуляционный насос;
- бак с электрическими тэнами;
- электронный контроллер, компьютер, термодатчики.

Задание: изучить описание установки и методику проведения лабораторной работы. Снять тепловые характеристики (при 4-х режимах движения теплоносителей) при прямоточной и противоточной схемах. Значения параметров занести в таблицу экспериментальных данных. Пользуясь тарировочным графиком определить количественные показатели режимов движения теплоносителей. Найти расчетные величины для всех режимов и результаты занести в таблицу расчетных данных. Определить значения коэффициентов теплопередачи $K_{оп}$ для всех режимов. Определив характер режима движения теплоносителей, решить соответствующие этим режимам критериальные уравнения с целью определения коэффициента теплоотдачи со стороны горячего теплоносителя α_1 и холодного теплоносителя α_2 . Далее вычислить значения коэффициентов теплопередачи K_p . Изобразить графически значения $K_{оп}$ и K_p в зависимости от расходов потока теплоносителей при прямоточной и противоточной схемах.

Требования к отчету: итоги лабораторной работы должны быть представлены на бланках формата А 4 по определенной форме, графики на миллиметровой бумаге. Работы выполняются побригадно, бригада составляет один отчет. В отчете должен быть приведен расчет по одному из режимов при прямоточной схеме и противоточной схеме, таблицы измеренных и рассчитанных величин и корреляционные графики $K_{оп}$ и K_p в зависимости от величины потока теплоносителей. Написать вывод. Приложить схему установки.

Контрольные вопросы:

1. Принцип действия теплообменных аппаратов.
2. Как осуществляется процесс теплопередачи в теплообменнике «труба в трубе»?
3. Для каких условий записаны уравнения тепловых балансов теплоносителей?
4. Какая разность температур входит в уравнение теплоотдачи, какая – в уравнение теплопередачи?
5. Что собой представляют критериальные уравнения?
6. Каков физический смысл коэффициента теплоотдачи и коэффициента теплопередачи?
7. Как вычисляются средние скорости теплоносителей?
8. Почему в работе расчет коэффициента теплопередачи через цилиндрическую поверхность можно вычислять как для плоской стенки?
9. Где выше движущая сила теплопередачи – в прямоточной или противоточной схемах движения теплоносителей?
10. Что собой представляет стационарный режим теплопередачи?

Библиографический список приводится в конце сборника описаний лабораторных работ.

Описание лабораторной работы
Теоретическая часть

Передача тепла от одного вещества – теплоносителя – к другому осуществляется в аппаратах, называемых *теплообменниками*. Теплообменные аппараты многочисленны по своему технологическому назначению и конструктивному оформлению весьма разнообразны. По принципу действия они могут быть разделены на рекуперативные, регенеративные и смешительные.

Регенеративными называются такие аппараты, в которых одна и та же поверхность нагрева омывается то горячим, то холодным теплоносителем. При протекании горячей жидкости теплота воспринимается стенками аппарата и в

них аккумулируется; при протекании холодной жидкости эта аккумулированная теплота ею воспринимается.

В смесительных аппаратах процесс теплопередачи происходит путем непосредственного соприкосновения и смешения горячего и холодного теплоносителей.

Рекуперативными называются такие аппараты, в которых теплота от горячего теплоносителя к холодному передается через разделяющую их стенку. Примером такого рекуперативного теплообменного аппарата является теплообменник труба в трубе", состоящий из двух concentric труб разных диаметров, рис. 4.1. По внутренней трубе проходит один теплоноситель, по кольцевому межтрубному пространству – другой. Тепло передается через стенку внутренней трубы.

Горячий теплоноситель непрерывно поступает во внутреннюю трубу и отдает тепло холодному теплоносителю, движущемуся в кольцевом межтрубном пространстве теплообменника.

Теплоноситель, проходящий по внутренней трубе, охлаждается от начальной температуры t_1' до t_1'' , а холодный нагревается от начальной температуры t_2' до конечной t_2'' , рис. 4.2.

Термическое сопротивление. Выделим в некотором месте внутренней трубы теплообменника бесконечно малый кольцевой участок поверхности dF , рис. 4.1. Пусть в этом месте температура горячего теплоносителя внутри трубы будет t_1 , а температура холодного теплоносителя снаружи трубы будет t_2 . Тогда для установившегося процесса передача тепла от горячего к холодному теплоносителю через участок поверхности dF можно написать следующие уравнения:

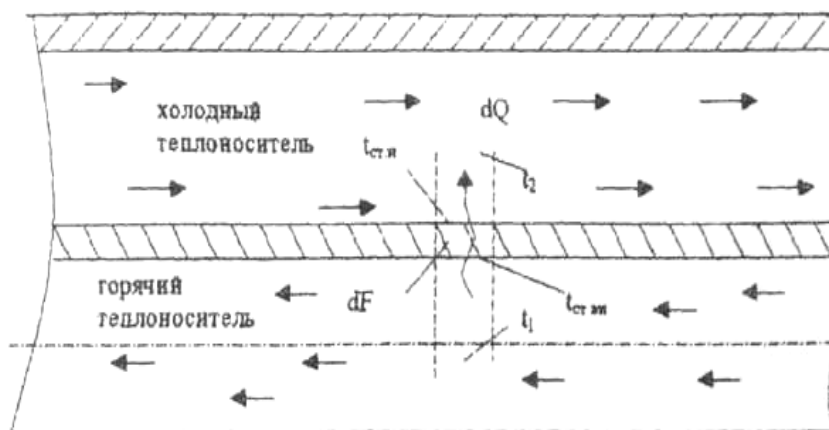


Рис. 4.1. Схема процесса теплопередачи

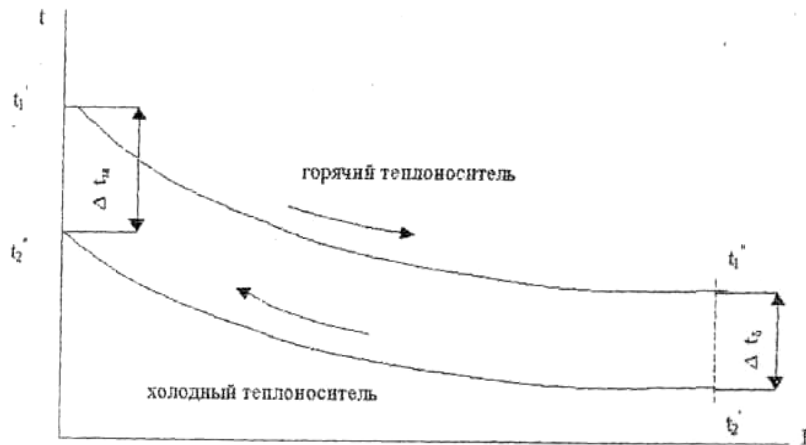


Рис. 4.2. Изменение температур теплоносителей вдоль поверхности теплообмена (противоток)

1. Уравнение теплоотдачи – перехода теплоты от горячего теплоносителя к внутренней поверхности стенки трубы:

$$dQ = \frac{t_1 - t_{\text{ст.вн.}}}{r_1} dF. \quad (4.1)$$

2. Уравнение теплопроводности – перехода тепла через стенку трубы, состоящую из нескольких слоев (слой так называемого водяного камня, или накипи, внутренний слой ржавчины, сталь, наружный слой ржавчины):

$$dQ = \frac{t_{\text{ст.вн.}} - t_{\text{ст.н.}}}{\sum r_{cm}} dF. \quad (4.2)$$

3. Уравнение теплоотдачи – перехода тепла от наружной поверхности стенки трубы к холодному теплоносителю:

$$dQ = \frac{t_{\text{ст.н.}} - t_2}{r_2} dF. \quad (4.3)$$

В этих уравнениях: dQ – расход передаваемого тепла, Вт; $t_{\text{ст.вн.}}$, $t_{\text{ст.н.}}$ – температуры внутренней и наружной поверхности трубы, $^{\circ}\text{C}$; r_1 – термическое сопротивление при переходе тепла от горячего теплоносителя к внутренней поверхности трубы, $\frac{\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}}{\text{Вт}}$; r_2 – термическое сопротивление при переходе тепла от наружной поверхности трубы к холодному теплоносителю,

$\frac{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С}}{\text{Вт}}$; $\sum r_{\text{ст}}$ – сумма термических сопротивлений слоев, из которых состоит стенка, $\frac{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С}}{\text{Вт}}$.

Поверхность dF во всех трех уравнениях принята одинаковой, т. е. стенка считается плоской, что допустимо, когда толщина стенки мала по сравнению с диаметром.

Из уравнений (4.1)–(4.3) получаем *уравнение теплопередачи* – перехода тепла от горячего теплоносителя к холодному:

$$dQ = \frac{t_1 - t_2}{r_1 + \sum r_{\text{ст}} + r_2} dF = \frac{t_1 - t_2}{R} dF, \quad (4.4)$$

где $R = r_1 + \sum r_{\text{ст}} + r_2$ – общее термическое сопротивление при переходе тепла от горячего теплоносителя к холодному через стенку трубы.

При расчетах вместо термических сопротивлений r_1 и r_2 пользуются обратными величинами

$$\alpha_1 = \frac{1}{r_1} \text{ и } \alpha_2 = \frac{1}{r_2},$$

которые называются *коэффициентами теплоотдачи*, соответственно для горячего и холодного теплоносителей и имеют размерность $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С}}$, а

$$r_{\text{ст}} = \frac{\delta}{\lambda_{\text{ст}}} \quad (\delta - \text{толщина стенки, м; } \lambda_{\text{ст}} - \text{теплопроводность стенки, } \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^\circ\text{С}})$$

При этом уравнения теплоотдачи (4.1) и (4.3) получают вид:

$$dQ = \alpha_1 (t_1 - t_{\text{ст.вн.}}) dF, \quad (4.5)$$

$$dQ = \alpha_2 (t_{\text{ст.вн.}} - t_2) dF, \quad (4.6)$$

Величина, обратная общему термическому сопротивлению R , называется *коэффициентом теплопередачи* K :

$$K = \frac{1}{R} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum \frac{\delta}{\lambda_{\text{ст}}} + \frac{1}{\alpha_2}}. \quad (4.7)$$

Для всего теплообменника с поверхностью теплопередачи F , м^2 , в котором расход передаваемого тепла составит Q , Вт, интегрирование уравнения (4.4) приводит к уравнению теплопередачи следующего вида:

$$Q = K F \Delta t_{\text{cp}}, \quad (4.8)$$

где Δt_{cp} – средняя движущая сила процесса теплопередачи в теплообменнике (средняя разность температур горячего и холодного теплоносителей), определяется уравнением:

$$\Delta t_{\text{cp}} = \frac{\Delta t_{\text{б}} - \Delta t_{\text{м}}}{\ln \frac{\Delta t_{\text{б}}}{\Delta t_{\text{м}}}}. \quad (4.9)$$

Здесь $\Delta t_{\text{б}} = t_1' - t_2'$; $\Delta t_{\text{м}} = t_1'' - t_2''$.

Эти разности температур представляют собой движущие силы процесса теплопередачи на концах теплообменника - на входе и на выходе (при прямо точной схеме движения теплоносителей) и $\Delta t_{\text{б}} = t_1'' - t_2''$ и $\Delta t_{\text{м}} = t_1' - t_2'$ - при противоточной схеме движения теплоносителей, рис. 4.2.

Если $\frac{\Delta t_{\text{б}}}{\Delta t_{\text{м}}} \leq 1,7$, то с достаточной точностью можно считать

$$\Delta t_{\text{cp}} = \frac{\Delta t_{\text{б}} + \Delta t_{\text{м}}}{2}. \quad (4.10)$$

Расход тепла Q в уравнении (4.8) рассчитывают по формуле:

$$Q = Q_1 = G_1 c_{p1} (t_1' - t_1'') = Q_2 = G_2 c_{p2} (t_2'' - t_2'), \quad (4.11)$$

где Q_1 , Q_2 – количество теплоты, отданное горячим и воспринятое холодным теплоносителем, Вт; G_1 , G_2 – массовые расходы горячего и холодного теплоносителей, $\frac{\text{кг}}{\text{с}}$; c_{p1} , c_{p2} – средние удельные массовые теплоемкости

теплоносителей при постоянном давлении, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$; t_1' , t_1'' – температуры горячего теплоносителя на входе и выходе из аппарата, $^\circ\text{C}$; t_2' , t_2'' – температуры холодного теплоносителя на входе и выходе из аппарата, $^\circ\text{C}$.

В работе для определения теоретического значения коэффициента теплопередачи K необходимо расчетным путем найти коэффициенты теплоотдачи α_1 и α_2 , которые зависят от большого числа переменных,

обуславливающих протекание процесса (физических параметров и характера движения теплоносителей, формы и размеров поверхности нагрева и т. п.).

Эти коэффициенты теплоотдачи могут быть получены с помощью уравнений, связывающих между собой обобщенные безразмерные переменные, характеризующие процесс и называемые критериями подобия.

При совместном свободно-вынужденном движении потока жидкости по прямому каналу или трубе без изменения агрегатного состояния обобщенная критериальная зависимость для определения коэффициента теплоотдачи имеет вид

$$Nu = f(Re, Pr, Gr), \quad (4.12)$$

где $Nu = \frac{\alpha d_{\text{эк}}}{\lambda}$ – критерий Нуссельта; $Re = \frac{wd_{\text{эк}}\rho}{\mu}$ – критерий Рейнольдса;

$Pr = \frac{c_p \mu}{\lambda}$ – критерий Прандтля; $Gr = \frac{gd_{\text{эк}}^3}{\nu^2} \beta \Delta t$ – критерий Грасгофа.

Здесь $d_{\text{эк}}$ – эквивалентный диаметр трубопровода, м; w – средняя скорость теплоносителя в трубопроводе (или канале), $\frac{\text{м}}{\text{с}}$; ρ – плотность теплоносителя при средней температуре, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$; μ – вязкость теплоносителя при средней температуре, $\text{Па} \cdot \text{с}$; c_p – удельная массовая теплоемкость при средней температуре, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ \text{C}}$; λ – теплопроводность теплоносителя при средней температуре, $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^\circ \text{C}}$; g – ускорение силы тяжести, $\frac{\text{м}}{\text{с}^2}$; ν – коэффициент кинематической вязкости при средней температуре, $\frac{\text{м}^2}{\text{с}}$; β – коэффициент объемного расширения теплоносителя, K^{-1} ; Δt – температурный напор (разность температур поверхности стенки и теплоносителя омывающего эту стенку), $^\circ \text{C}$.

Для расчета выбирается критериальное уравнение в зависимости от режима движения теплоносителя в аппарате.

При *ламинарном* режиме движения внутри прямых гладких труб ($Re_1 < 2320$):

$$Nu_1 = 0,25 \left(Re_1 \frac{d_{\text{вн}}}{l} \right)^{0,4} Pr_1^{0,33} \left(\frac{Pr_1}{Pr_{\text{ст1}}} \right)^{0,25}, \quad (4.13)$$

где $d_{\text{вн}}$ – внутренний диаметр трубы, м; l – длина внутренней трубы, м;
 $\left(\frac{\text{Pr}_1}{\text{Pr}_{\text{ctl}}}\right)^{0,25}$ – множитель, учитывающий зависимость физических свойств (в основном вязкости) от температуры и влияние направления теплового потока. При нагревании капельной жидкости $\left(\frac{\text{Pr}_1}{\text{Pr}_{\text{ctl}}}\right) > 1$, при охлаждении $\left(\frac{\text{Pr}_1}{\text{Pr}_{\text{ctl}}}\right) < 1$.

При *переходном* режиме ($2320 < \text{Re}_1 < 10^4$):

$$\text{Nu}_1 = 0,008 \text{Re}^{0,9} \text{Pr}^{0,43} \left(\frac{\text{Pr}_1}{\text{Pr}_{\text{ctl}}}\right)^{0,25}. \quad (4.14)$$

При *турбулентном* режиме ($\text{Re}_1 \geq 10$):

$$\text{Nu}_1 = 0,023 \text{Re}^{0,8} \text{Pr}^{0,4} \left(\frac{\text{Pr}_1}{\text{Pr}_{\text{ctl}}}\right)^{0,25}, \quad (4.15)$$

Теплоотдача при движении теплоносителя между коаксиальными трубами (в кольцевом канале), если наружный диаметр внутренней трубы, омываемый теплоносителем, равен $d_{\text{н}}$, а внутренний диаметр внешней трубы равен $D_{\text{вн}}$, описывается следующими критериальными уравнениями.

При *ламинарном* режиме движения ($\text{Re}_2 < 2320$):

$$\text{Nu}_2 = 0,17 (\text{Re}_2 \cdot \text{Pr}_2)^{0,33} (Gr_2 \cdot \text{Pr}_2)^{0,1} \left(\frac{\text{Pr}_2}{\text{Pr}_{\text{ctl}}}\right)^{0,25}. \quad (4.16)$$

При *переходном* режиме ($2320 < \text{Re}_2 < 10^4$)

$$\text{Nu}_2 = 0,037 \text{Re}_2^{0,75} \text{Pr}_2^{0,4} \left(\frac{\mu_2}{\mu_{\text{ctl}}}\right)^n, \quad (4.17)$$

где μ_2 – динамический коэффициент вязкости теплоносителя при средней температуре в кольцевом зазоре, Па·с; μ_{ctl} – динамический коэффициент

вязкости теплоносителя при температуре стенки ($t_{\text{ст}} = 0,5(t_1 + t_2)$; $t_1 = t_1' - t_1''$ и $t_2 = t_2'' - t_2'$), Па·с; $n = 0,11$ при нагревании и $n = 0,25$ при охлаждении.

При турбулентном режиме ($Re_2 > 10^4$):

$$Nu_2 = Nu_{\infty} \left(1 - \frac{0,45}{2,4 + Pr_2} \right) \frac{D_{\text{вн}}}{d_{\text{н}}}, \quad (4.18)$$

где Nu_{∞} выбирается из таблицы 4.1.

Таблица 4.1

$\frac{D_{\text{вн}}}{d_{\text{н}}}$	10	5	2,5	1,7	1,25	1,0
Nu_{∞}	4,1	4,18	4,33	4,5	4,7	4,86

В уравнениях (4.16)–(4.18) определяющим геометрическим размером является $d_{\text{эк}} = D_{\text{вн}} - d_{\text{н}}$; определяющей температурой в критериальных уравнениях (4.13) – (4.18) служит средняя температура каждого из теплоносителей.

Выражая среднюю скорость жидкости через ее расход для теплоносителя, движущегося по внутренней трубе,

$$w_1 = \frac{G_1}{0,785 d_{\text{вн}}^2 \rho_1}, \quad (4.19)$$

а для теплоносителя, движущегося по кольцевому каналу,

$$w_2 = \frac{G_2}{0,785 (D_{\text{вн}}^2 - d_{\text{н}}^2) \rho_2}, \quad (4.20)$$

их следует подставить в выражения критериев Рейнольдса Re_1 и Re_2 , соответственно.

Описание установки

Схема установки представлена на рис. 4.3. Теплообменник "труба в трубе" 7 состоит из четырех секций, расположенных вертикально и покрытых теплоизоляцией. Стальные трубы теплообменника имеют диаметр:

наружные – $57 \times 3,5$ мм, внутренние – 21×3 мм. Нагрев воды осуществляется в термостате 2 за счет электрических ТЭНов 3 мощностью 9,6 кВт. Нагретая вода с помощью насоса 4 подается во внутреннюю трубу теплообменника. Расход горячей воды регулируется вентилем 15 и измеряется ротаметром 5. Холодный поток воды из водопровода поступает непосредственно в теплообменник и движется по кольцевому зазору между наружной поверхностью внутренней трубы и внутренней поверхностью внешней трубы. При этом направление холодной воды можно изменять с помощью регулятора потока 7, что позволяет организовать прямоток или противоток. Расход холодной воды регулируется вентилем 14 и измеряется ротаметром 6. При этом холодный поток нагревается, а горячий охлаждается. Температуры горячего и холодного теплоносителей на входе и выходе их теплообменника измеряют с помощью термометров сопротивлений I – IV. Показания температур и тепловых нагрузок со стороны горячего и холодного теплоносителей через специальное устройство – контроллер 8 выведены на экран монитора компьютера 9. На пульте управления 10 расположены тумблера и кнопки включения электрических ТЭНов, двигателя насоса и компьютера.

Температурные датчики 11 служат для поддержания теплового режима горячего теплоносителя с помощью электрических ТЭНов.

Методика проведения работы

В начале работы открывают вентиль 12 на сливе холодной воды, и с помощью вентиля 13 и 14 подают холодную воду в теплообменник и устанавливают максимальный расход по ротаметру 6. После чего с помощью тумблеров включают электрические ТЭНы 3, работа которых сигнализируется контрольными лампочками 16 на магнитном пускателе 17. Нагрев воды в термостате 2 до температуры порядка $80...90^{\circ}\text{C}$ происходит в течение 30...40 мин. Подачу воды на линии горячего теплоносителя в теплообменник с помощью насоса 4 производят одновременно с включением ТЭНов, что позволяет ускорить получение заданного температурного режима в системе термостат-теплообменник. При этом также с помощью вентиля 14 задают максимальный расход холодного теплоносителя по ротаметру 6. Температурный режим в работе контролируется на мониторе компьютера.

После выхода установки на стационарный режим, регулятором потока 7 задают прямоточное направление движения теплоносителей, расходы их устанавливают минимальными и по возможности одинаковыми. Выход на заданный режим происходит в течение 5...10 мин. После чего, снимаются показания температур теплоносителей, расходов по тарифовочным графикам (приведены на стенде), тепловых нагрузок и данные заносятся в таблицу 4.2. Далее устанавливается следующий режим по расходам теплоносителей с помощью ротаметров и в той же последовательности снимаются показания.

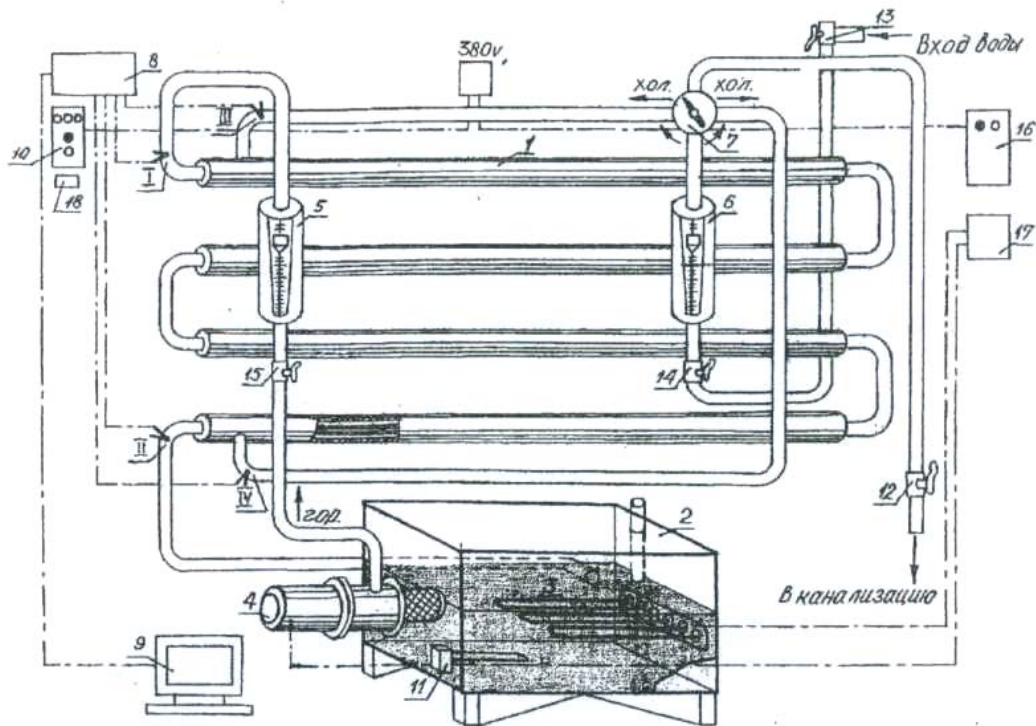


Рис. 4.3. Схема установки:

- 1 – теплообменник "труба в трубе"; 2 – термостат; 3 – электрические ТЭНы;
 4 – насос; 5, 6 – ротаметры; 7 – регулятор потока; 8 – контроллер;
 9 – монитор компьютера; 10 – пульт управления; 11 – температурные датчики; 12–15 – вентили; 16 – контрольные лампочки; 17 – магнитный пускатель; 18 – щитовой выключатель

Проведя 5...6 режимов работы теплообменного аппарата по прямоточной схеме, переходят на противоточную и вновь выполняют эксперимент по той же методике. Все снятые показания заносятся в отчетную таблицу 4.2.

После завершения работы отключаются ТЭНы, насос и закрываются вентили на потоках теплоносителей. Работа компьютера отключается с помощью щитового выключателя 18.

Таблица 4.2

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

[illegible]

Таблица 4.3. РАСЧЕТНЫЕ ДАННЫЕ

[illegible]

Обработка опытных данных и составление отчета

Величину коэффициента теплопередачи K_{on} рассчитывают для различных значений теплового потока при прямоточной и противоточной схемах движения теплоносителей по уравнению (4.8) и заносят в отчетную таблицу 4.3. При этом теплопередающая поверхность F рассчитывается по среднему диаметру внутренней трубы d_{cp} и включает число секций теплообменника; длина одной теплопередающей секции $l = 1,5$ м.

Расход передаваемого тепла Q (тепловая нагрузка аппарата) определяют по уравнению (4.11), а среднюю движущую силу процесса теплопередачи – по уравнению (4.9) или (4.10).

Коэффициент теплопередачи K_p требует определения коэффициентов теплоотдачи со стороны горячего теплоносителя α_1 и холодного α_2 по одному из приведенных критериальных уравнений (4.13) – (4.15) и (4.16) – (4.18) в зависимости от режима движения теплоносителя.

Теплопроводность стенки трубы $\lambda_{ст} = 17,5 = 17,5 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^\circ\text{C}}$ Рассчитанные значения коэффициентов теплоотдачи α_1 и α_2 , а также K_p заносят в таблицу 4.3. Теплофизические параметры воды на линии насыщения приведены в таблице 4.4. После вычисления K_{on} и K_p строят корреляционный график.

Таблица 4.4

Теплофизические свойства воды на линии насыщения

Температура, $t, ^\circ\text{C}$	Плотность, $\rho, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	Теплоемкость, $c_p, \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$	Теплопроводность, $\lambda \cdot 10^2, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^\circ\text{C}}$	Коэф-т температуропроводности, $a \cdot 10^6, \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$	Коэф-т динамической вязкости, $\mu \cdot 10^6, \frac{\text{Па} \cdot \text{с}}$	Коэффициент кинематической вязкости, $\nu \cdot 10^6, \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$
0	999,9	4,212	55,1	13,1	1788	1,789
10	999,7	4,191	57,4	13,7	1306	1,306
20	998,2	4,183	59,9	14,3	1004	1,006
30	995,7	4,174	61,8	14,9	801,5	0,805
40	992,2	4,174	63,5	15,3	653,3	0,659
50	988,1	4,174	64,8	15,7	549,4	0,556
60	983,2	4,179	65,9	16,0	469,9	0,478
70	977,8	4,187	66,8	16,3	406,1	0,415
80	971,8	4,195	67,4	16,6	355,1	0,365
90	965,3	4,208	68,0	16,8	314,9	0,326
100	958,4	4,220	68,3	16,9	282,5	0,295

Лабораторная работа № 5

4 часа

Изучение процесса теплопередачи и гидравлического сопротивления в рекуперативном двухходовом теплообменном аппарате

Цель работы:

- изучение процесса теплообмена на действующем аппарате;
- экспериментальное изучение влияния скорости движения теплоносителя на интенсивность теплообмена;
- экспериментальное определение коэффициента теплопередачи K в теплообменном аппарате (конденсаторе);
- получение зависимости термического сопротивления стенки со стороны воды от критерия Рейнольдса;
- построение зависимости критерия Эйлера от критерия Рейнольдса.

Задачи работы: рассчитать величину коэффициента теплопередачи K при различных (не менее 3-х) расходах холодного теплоносителя. Определить полное гидравлическое сопротивление теплообменника. Определить режим движения холодного теплоносителя при каждом из расходов, вычислить критерии Рейнольдса Re и Эйлера Eu и построить график зависимости $Eu = f(Re)$.

Обеспечивающие средства: лабораторный стенд в аудитории 10–2 в составе:

- рекуперативный двухходовой теплообменный аппарат;
- парогенератор (паровой котел);
- счетчик расхода воды;
- дифференциальный манометр;
- измеритель температуры.

Задание: изучить описание установки и методику проведения лабораторной работы. Снять тепловые характеристики конденсатора в различных режимах движения (не менее 3-х) холодного теплоносителя с одновременной регистрацией давления греющего пара. Значения величин занести в таблицу экспериментальных данных. Рассчитать коэффициент теплопередачи K , предварительно определив режим движения холодного теплоносителя (воды) и, соответственно, общее термическое сопротивление теплообменника, то есть численные значения Re – критерия Рейнольдса, α_n – коэффициент теплоотдачи от пара и α_b – коэффициент теплоотдачи от стенки к воде. Рассчитать местные гидравлические сопротивления $\Delta p_{мс}$, гидравлическое сопротивление трения $\Delta p_{тр}$ в трубном пространстве и общее гидравлическое сопротивление Δp – необратимую потерю давления потока

воды, определить численные значения критерия Эйлера Eu . Построить график $Eu = f(Re)$ зависимости критерия Эйлера от критерия Рейнольдса. Написать вывод.

Требования к отчету: итоги лабораторной работы должны быть представлены на бланках формата А 4 по определенной форме, графики на миллиметровой бумаге. Работы выполняются побригадно, бригада составляет один отчет. В отчете должны быть приведены таблицы измеренных и рассчитанных величин, расчет по одному из режимов, графики зависимости термического сопротивления стенок со стороны воды от критерия Рейнольдса Re и зависимости критерия Эйлера от критерия Рейнольдса то есть $Eu = f(Re)$. Написать выводы.

Контрольные вопросы:

1. Из чего складывается общее термическое сопротивление при переходе тепла от конденсирующего пара к воде?
2. Какая разность температур входит в уравнение теплоотдачи и какая в уравнение теплоотдачи?
3. В чем различие между коэффициентом теплоотдачи и коэффициентом теплоотдачи по физическому смыслу?
4. Конструкция и принцип работы многоходового теплообменного аппарата.
5. К чему приводит увеличение ходов?
6. Для чего служит электрокотел и какой пар он вырабатывает?
7. Почему необходимо поддерживать постоянным давление греющего пара?
8. Как определить экспериментально общее термическое сопротивление в теплообменнике?
9. Какие две различные величины обозначаются одной и той же буквой λ ?
10. Какие гидравлические сопротивления преодолевает вода при движении во многоходовом теплообменном аппарате?
11. Как рассчитываются потери давления в теплообменном аппарате?
12. Какова зависимость потерь давления от скорости воды в теплообменном аппарате?

Библиографический список приводится в конце сборника описаний лабораторных работ.

Описание лабораторной работы Теоретическая часть

Рекуперативные (кожухотрубчатые) теплообменники относятся к наиболее распространенным производственным теплообменным аппаратам. Рекуперативный теплообменник состоит из пучка труб, концы которых закреплены в трубных решетках, наружного корпуса и двух крышек, рис. 5.1. Назначение теплообменника – передача тепла от одного вещества, проходящего по трубному (межтрубному) пространству теплообменника, к другому веществу, проходящему по межтрубному (или трубному) пространству.

В данной работе изучается передача тепла в рекуперативном теплообменнике при нагревании в нем воды греющим водяным паром (насыщенным), поступающим из парового электродкотла.

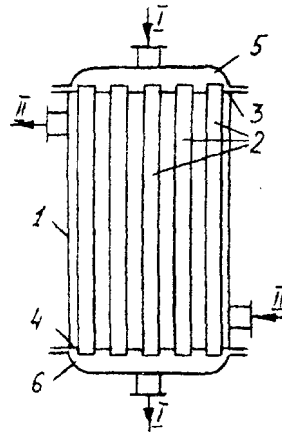


Рис. 5.1. Схема рекуперативного теплообменного аппарата:
1 – корпус; 2 – пучок труб; 3, 4 – решетка трубная; 5, 6 – крышка;
I, II – теплоносители

Рассмотрим процесс перехода тепла от пара, конденсирующегося в межтрубном пространстве, через стенку трубки к воде, проходящей по трубке, рис. 5.2. давление пара постоянно во времени и практически одинаково в любом месте межтрубного пространства, следовательно, везде вдоль поверхности трубки будет одинакова и температура конденсирующегося пара. Температура воды вдоль поверхности трубки будет меняться, т. к. вода, проходя по трубке, нагревается.

Термическое сопротивление. Выделим в некотором месте трубки бесконечно малый кольцевой участок поверхности dF . Пусть в этом месте температура воды внутри трубки будет t_b . Тогда для установившегося процесса перехода тепла через участок поверхности dF можно написать следующие уравнения.

1. Уравнение теплоотдачи – перехода тепла от конденсирующегося пара к наружной поверхности трубки:

$$dQ = \left(\frac{t_{\text{п}} - t_{\text{ст.н.}}}{r_{\text{п}}} \right) dF. \quad (5.1)$$

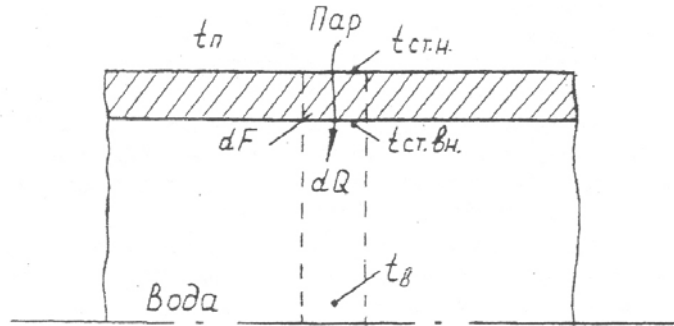


Рис. 5.2. Схема процесса теплопередачи

2. Уравнение теплопроводности – перехода тепла через стенку трубки:

$$dQ = \left(\frac{t_{\text{ст.н.}} - t_{\text{ст.вн.}}}{r_{\text{ст}}} \right) dF. \quad (5.2)$$

3. Уравнение теплоотдачи – перехода тепла от внутренней поверхности трубки к воде:

$$dQ = \left(\frac{t_{\text{ст.вн.}} - t_{\text{в}}}{r_{\text{в}}} \right) dF. \quad (5.3)$$

В этих уравнениях: dQ – расход тепла, переходящего от пара к воде, Вт; dF – участок поверхности, через которую проходит тепло, м^2 ; $t_{\text{ст.н.}}$, $t_{\text{ст.вн.}}$ – температуры наружной и внутренней поверхности трубки на этом участке, $^{\circ}\text{C}$; $r_{\text{п}}$ – термическое сопротивление со стороны конденсирующегося пара к наружной поверхности трубки, $\frac{\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}}{\text{Вт}}$; $r_{\text{ст}}$ – термическое сопротивление при переходе тепла через стенку трубки, $\frac{\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}}{\text{Вт}}$; $r_{\text{в}}$ – термическое сопротивление со стороны воды к внутренней поверхности трубки, $\frac{\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}}{\text{Вт}}$.

Уравнения (5.1) – (5.3) показывают, что расход тепла пропорционален движущей силе – разности температур и обратно пропорционален термическому сопротивлению.

Каждое из этих трех однотипных уравнений описывает переход количества тепла dQ на отдельном участке его пути от конденсирующегося пара к воде. Поверхность dF во всех трех уравнениях принята одинаковой, т. е. на рассматриваемом участке стенка трубки считается плоской, что допустимо для тонкостенной трубки, когда толщина стенки мала по сравнению с диаметром.

После преобразований из уравнений (5.1)–(5.3) получается уравнение, описывающее переход количества тепла dQ на всем пути от пара к воде.

$$dQ = \left(\frac{t_{\text{п}} - t_{\text{в}}}{r_{\text{п}} + r_{\text{ст}} + r_{\text{в}}} \right) dF = \left(\frac{t_{\text{п}} - t_{\text{в}}}{R} \right) dF \quad (5.4)$$

где $R = r_{\text{п}} + r_{\text{ст}} + r_{\text{в}}$ – общее термическое сопротивление при переходе тепла от конденсирующегося пара к воде через стенку трубки.

При расчетах вместо термических сопротивлений $r_{\text{п}}$ и $r_{\text{в}}$ пользуются обратными величинами:

$$\alpha_{\text{п}} = \frac{1}{r_{\text{п}}} \quad \text{и} \quad \alpha_{\text{в}} = \frac{1}{r_{\text{в}}},$$

которые называются *коэффициентами теплоотдачи*, соответственно для пара и для воды.

При этом уравнения теплоотдачи (5.1) и (5.3) принимают вид:

$$dQ = \alpha_{\text{п}} (t_{\text{п}} - t_{\text{ст.п}}) dF \quad (5.5)$$

$$dQ = \alpha_{\text{в}} (t_{\text{ст.в}} - t_{\text{в}}) dF \quad (5.6)$$

Величину K , обратную общему термическому сопротивлению R и равную

$$K = \frac{1}{R} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{п}}} + r_{\text{ст}} + \frac{1}{\alpha_{\text{в}}}} \quad (5.7)$$

называют *коэффициентом теплопередачи*, а преобразованное уравнение (5.4)

$$dQ = K (t_{\text{п}} - t_{\text{в}}) dF \quad (5.8)$$

уравнением теплопередачи.

Для всего теплообменника с поверхностью теплопередачи F , м^2 , в котором расход передаваемого тепла составляет Q , Вт, интегрирование уравнения (5.8) приводит к уравнению теплопередачи следующего вида:

$$dQ = KF\Delta t_{\text{cp}} \quad (5.9)$$

где Δt_{cp} – средняя движущая сила процесса теплопередачи, т. е. средняя разность температур пара и воды в теплообменнике, определяемая одним из теоретических уравнений, $^{\circ}\text{C}$:

$$\Delta t_{\text{cp}} = \frac{\Delta t_{\text{г}} + \Delta t_{\text{м}}}{2} \quad (5.10)$$

здесь $\Delta t_{\text{г}} = t_{\text{п}} - t_{\text{в}}^{\text{н}}$ – разность температур пара и воды на входе в теплообменник; $\Delta t_{\text{м}} = t_{\text{п}} - t_{\text{в}}^{\text{к}}$ – разность температур пара и воды на выходе из теплообменника.

Уравнение (5.10) справедливо, если отношение $\frac{\Delta t_{\text{г}}}{\Delta t_{\text{м}}} \leq 1,7$. Если отношение $\frac{\Delta t_{\text{г}}}{\Delta t_{\text{м}}} > 1,7$, расчет Δt_{cp} , следует вести по формуле:

$$\Delta t_{\text{cp}} = \frac{\Delta t_{\text{г}} - \Delta t_{\text{м}}}{\ln \frac{\Delta t_{\text{г}}}{\Delta t_{\text{м}}}} \quad (5.11)$$

Расход тепла Q в уравнении (5.9) легко рассчитать, если известен расход воды, не сопровождающийся фазовым переходом:

$$Q = G_{\text{в}} c_p (t_{\text{в}}^{\text{к}} - t_{\text{в}}^{\text{н}}) \quad (5.12)$$

где $G_{\text{в}}$ – массовый расход воды, $\frac{\text{кг}}{\text{с}}$; c_p – средняя массовая теплоемкость воды при постоянном давлении, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C}}$.

Определение коэффициента теплоотдачи является одной из основных задач теории теплообмена. В настоящее время коэффициенты теплоотдачи рассчитываются из критериальных соотношений, в которых вид обобщенных безразмерных переменных (критериев подобия) определяется теоретически на

основе теории подобия, а явный вид зависимости между критериями находится экспериментально для каждого вида теплообмена.

В данной установке холодная вода проходит по внутренним поверхностям трубок и нагревается насыщенным водяным паром, поступающим в межтрубное пространство и конденсирующимся на наружной поверхности трубок.

При пленочной конденсации чистого насыщенного пара на вертикальных поверхностях трубок коэффициент теплоотдачи от пара к стенке трубок может быть определен по формуле:

$$\alpha_n = 3,78 \cdot \lambda \cdot \sqrt[3]{\frac{\rho^2 d_n n}{\mu G_n} \cdot \frac{Pr}{Pr_{ст}}} \quad (5.13)$$

где λ – коэффициент теплопроводности конденсата греющего пара, $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^\circ \text{C}}$;

ρ – плотность конденсата греющего пара, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$; μ – вязкость конденсата

греющего пара, $\text{Па} \cdot \text{с}$; G_n – расход греющего пара, $\frac{\text{кг}}{\text{с}}$; d_n – наружный диаметр трубки, м; n – число трубок; Pr , $Pr_{ст}$ – критерий Прандтля для конденсата греющего пара.

Значения величин λ , ρ , μ и Pr в уравнении (5.13) необходимо определять при температуре конденсации пара, а значение $Pr_{ст}$ при температуре стенки трубы, на которой происходит конденсация пара.

При *вынужденном* движении потока жидкости по прямому каналу или трубе без изменения агрегатного состояния обобщенная критериальная зависимость для определения коэффициента теплоотдачи имеет вид:

$$Nu = A Re^m Pr^n \left(\frac{Pr}{Pr_{ст}} \right)^P, \quad (5.14)$$

где $Nu = \frac{\alpha_v d_{вн}}{\lambda}$ – критерий Нуссельта; $Re = \frac{w d_{вн} \rho}{\mu}$ – критерий Рейнольдса;

$Pr = \frac{c_p \cdot \mu}{\lambda}$ – критерий Прандтля.

Здесь A , m , n , P – безразмерные постоянные, определяемые опытным путём; α_v коэффициент теплоотдачи для воды, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ \text{C}}$; w – скорость воды в

трубках, $\frac{\text{м}}{\text{с}}$; $d_{вн}$ – внутренний диаметр трубки, м.

При турбулентном движении жидкости ($Re \geq 10^4$) коэффициент теплоотдачи рассчитывается по уравнению:

$$\alpha_B = 0,021 \frac{\lambda}{d_{BH}} Re^{0,8} Pr^{0,43} \left(\frac{Pr}{Pr_{ст2}} \right)^{0,25} \quad (5.15)$$

При ламинарном режиме движения ($Re \leq 2320$):

$$\alpha_B = 1,4 \frac{\lambda}{d_{BH}} \left(Re \cdot \frac{d_{BH}}{l} \right)^{0,4} Pr^{0,33} \left(\frac{Pr}{Pr_{ст2}} \right)^{0,25}, \quad (5.16)$$

где l – длина трубки, м.

Теплоотдача в переходной области ($2320 < Re < 10^4$) точных расчетных зависимостей не имеет. Для практических расчетов рекомендуется пользоваться рис. 5.3 или приближенным уравнением:

$$\alpha_B = 0,008 \frac{l}{d_{BH}} Re^{0,9} Pr^{0,43} \left(\frac{Pr}{Pr_{ст2}} \right)^{0,25} \quad (5.17)$$

Гидравлическое сопротивление. При протекании воды через кожухотрубчатый теплообменник, рис. 5.4, гидравлическое сопротивление, т. е. необратимая потеря давления потоком воды Δp , складывается из сопротивления трения $\Delta p_{тр}$ в трубном пространстве теплообменника и суммы местных сопротивлений $\Delta p_{мс.}$:

$$\Delta p = \Delta p_{тр} + \Delta p_{мс.} \quad (5.18)$$

Потери давления на трение в трубках $\Delta p_{тр}$, Па, находятся по первому слагаемому формулы (5.18):

$$\Delta p_{тр} = \lambda_{тр} \frac{l}{d_{BH}} \cdot \frac{\rho w^2}{2} z, \quad (5.19)$$

где $\lambda_{тр}$ – безразмерный коэффициент трения, являющийся функцией критерия Рейнольдса и относительной шероховатости стенок трубки; z – число ходов по трубному пространству.

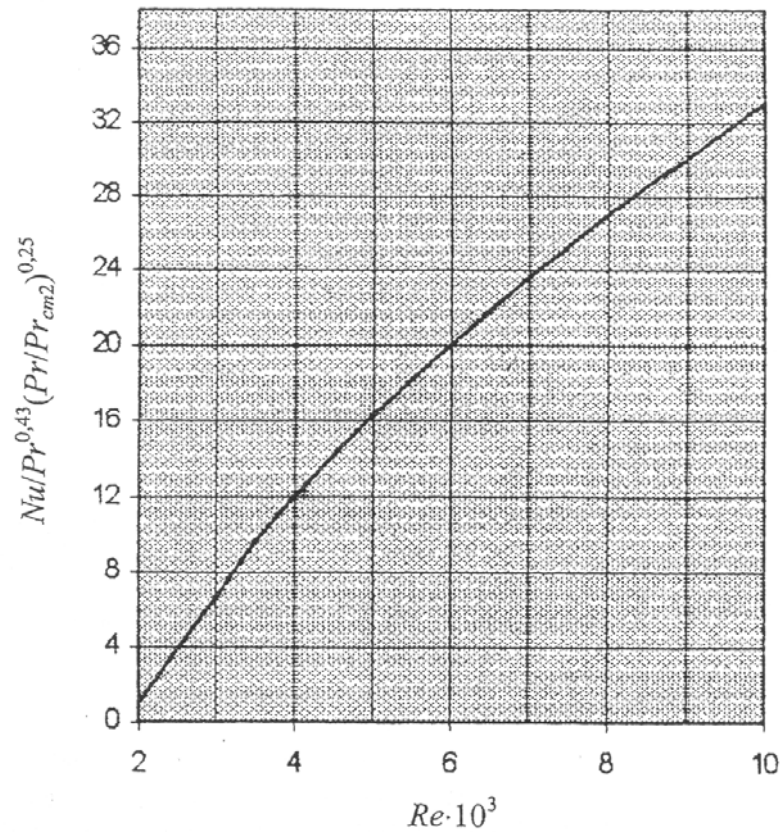


Рис. 5.3. Зависимость $\frac{Nu}{Pr^{0.43} \left(\frac{Pr}{Pr_{ст2}} \right)^{0.25}}$ от критерия Рейнольдса в переходной области

Общие потери давления на местных сопротивлениях $\Delta p_{мс.}$, Па:

$$\Delta p_{мс.} = \sum_i \zeta_i \frac{\rho w_i^2}{2}, \quad (5.20)$$

где ζ_i – значения коэффициентов местных сопротивлений; w – скорость потока для каждого i -го сопротивления, $\frac{м}{с}$. Остальные обозначения те же, что и в предыдущих формулах.

Общие потери давления на местных сопротивлениях $\Delta p_{мс.}$, Па:

$$\Delta p_{мс.} = \Delta p_{к.} + \Delta p_{ш.} + \Delta p_{т.} + \Delta p_{п.} \quad (5.21)$$

где Δp_k – потеря давления в колене (угольнике), определяется по скорости воды в колене, Па; $\Delta p_{ш}$ – потеря при выходе из штуцера и при входе в штуцер (вход и выход из камеры), определяется по скорости воды в штуцере, Па; Δp_t – потеря давления при входе в трубки и выходе из трубок вычисляется по скорости воды в трубках, Па; $\Delta p_{п}$ – потеря давления при повороте потока в камерах теплообменника вычисляется по скорости в трубках, Па.

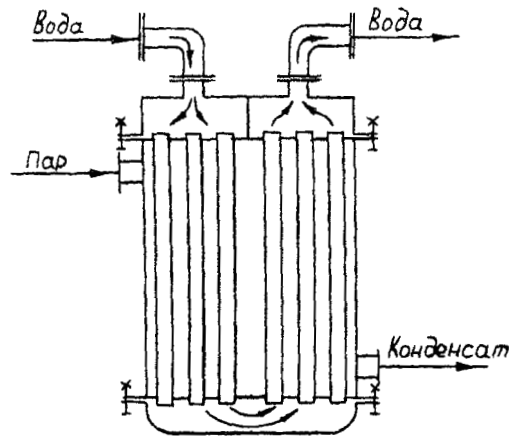


Рис. 5.4. Двухходовый теплообменник без перегородок

Коэффициенты местных сопротивлений по трубному пространству могут быть взяты из экспериментальных данных, согласно таблице 5.1.

Так как диаметр внутренних трубок теплообменника $d_{вн}$ отличается от диаметра присоединительных труб d , то скорости воды в них будут разные, и это условие должно быть учтено.

Таблица 5.1

Вид сопротивления	Коэффициент сопротивления, ζ_i
Вход в колено и выход из колена	$2 \cdot \zeta_k$ (2·2,1)
Вход в камеру и выход из камеры	$2 \cdot \zeta_{ш}$ (2·1,5)
Вход в трубки и выход из трубок	$4 \cdot \zeta_t$ (4·1)
Поворот на 180° между секциями (ходами)	$2,5 \cdot \zeta_{п}$ (2,5·1)

Для ламинарного течения воды в трубках теплообменника справедлива зависимость:

$$\lambda_{\text{тр}} = \frac{64}{\text{Re}}. \quad (5.22)$$

В области гидравлически гладких труб при $4 \cdot 10^3 < \text{Re} < 10^5$ справедлива формула:

$$\lambda_{\text{тр}} = 0,3164 \text{Re}^{-0,25}. \quad (5.23)$$

Описание установки

Установка, рис. 5.5, состоит из двухходового кожухотрубчатого теплообменного аппарата 1, в котором между двумя трубными решетками 2 расположены 16 латунных трубок 3 длиной $l = 825$ мм и диаметрами $\frac{d_{\text{н}}}{d_{\text{вн}}} = \frac{7}{5,3}$ мм. Пространство между верхней крышкой и трубной решеткой разделено продольной перегородкой на две секции, благодаря чему в аппарате образуется два хода (по 8 трубок в каждом ходе). Вода в аппарате нагревается паром, вырабатываемым в электропаровом котле 4 с номинальной производительностью до $25 \frac{\text{кг}}{\text{ч}}$ и рабочим давлением от 0,15 до 0,6 МПа. Холодная вода через штуцер 5 поступает в первую секцию, где она нагревается и движется вниз по трубкам теплообменника, затем перетекает во вторую секцию, поднимается по трубкам, нагревается и отводится из аппарата через штуцер 6. Расход воды определяется с помощью водомерного счетчика 7, а температуру воды на входе и выходе в теплообменник, температуру входящего пара и конденсата определяют с помощью термодатчиков I – IV, установленных непосредственно в потоках воды и пара и выведенных на показывающий прибор 17.

Для определения потери давления в аппарате (разности давлений со стороны воды на входе и на выходе из аппарата) установлен дифференциальный ртутный манометр (ДТ-50) 8.

Пар из котла через вентиль 9 поступает в межтрубное пространство аппарата. Давление пара измеряется по манометру 20, расположенному на пульте управления электрокотла 21. Отработанный пар через конденсатоотводчик 10 в виде конденсата сбрасывается в аккумулирующую емкость конденсата 11, а отработанная нагретая вода отводится в канализацию.

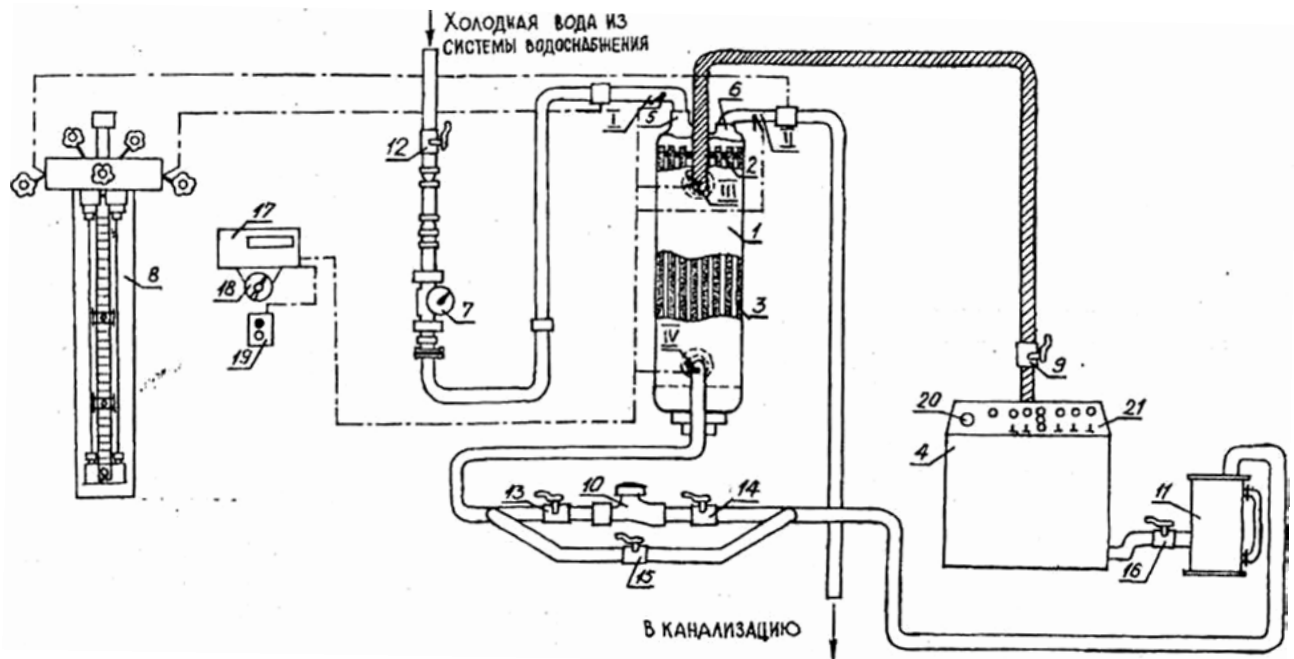


Рис. 5.5. Схема установки:

1 – теплообменный аппарат; 2 – трубная решетка; 3 – пучок трубок;
 4 – электрокотел; 5, 6 – штуцера; 7 – счетчик; 8 – дифференциальный
 манометр; 9, 12–16 – вентили; 10 – конденсатоотводчик; 11 – емкость
 конденсата; 17 – показывающий прибор; 18 – переключатель терморпар;
 19 – кнопки включения и выключения; 20 – манометр; 21 – пульт
 управления электрокотла

Методика проведения работы

Ознакомившись с установкой и с инструкцией по работе, получают задание от преподавателя на создание технологических режимов.

Открывают вентиль 12 для подачи холодной воды в аппарат и устанавливают ее максимальный расход. Величину максимального расхода устанавливают по перепаду давления на дифманометре 8 в пределах 120 – 150 мм рт. ст. Минимальный расход воды соответствует перепаду давления порядка 50 – 60 мм рт. ст. Затем открывают полностью вентиль 13 и с помощью вентиля 14 на трубопроводе отвода конденсата пара регулируют отбор конденсата. Так как техническое обслуживание электрокотла осуществляется только ведущим инженером данной лаборатории, то подготовка котла к работе и автоматизированное управление процессом подачи пара в аппарат путем открывания вентиля 9 на паропроводе выполняет инженер, а студенты лишь снимают показания приборов. Количество поступающего пара должно быть таким, чтобы вода нагревалась в аппарате до 40 – 60 °С. Спустя некоторое время, когда прогреются трубки

и корпус аппарата, и температура выходящей воды установится постоянной (на основании теплового баланса при постоянном давлении пара и постоянном количестве проходящей воды), что характеризует наступление стационарного режима – этот момент принимается за начало испытания.

В процессе проведения испытания аппарата через каждые 5 минут от начала работы регистрируют следующие параметры:

- температуру поступающей в аппарат холодной воды t_B^H ;
- температуру выходящей из аппарата нагретой воды t_B^K ;
- температуру греющего пара t_n ;
- температуру конденсата $\theta_{\text{конд}}$;
- количество проходящей через аппарат воды G_B (по показанию счетчика);
- давление греющего пара по манометру на пульте управления p_n ;
- перепад давления в аппарате Δp со стороны воды по дифференциальному манометру.

Продолжительность испытания 15 – 20 минут. Затем проводят еще три испытания аппарата и делают аналогичные замеры при расходе воды меньшем по сравнению с первым испытанием (параметры входящего пара при этом не меняются).

Все данные испытания заносят в отчетную таблицу 5.2.

По окончании проведения работы установку выключают в следующем порядке:

- инженер выключает работу электроркотла и закрывает вентиль для подачи пара;
- закрывают вентиль для подачи холодной воды.

Обработка опытных данных и составление отчета

Величину коэффициента теплопередачи K рассчитывают по формуле (5.7), где термическое сопротивление стенки $r_{\text{ст}}$ равно:

$$r_{\text{ст}} = \frac{\delta}{\lambda},$$

где λ – коэффициент теплопроводности латуни, $\lambda = 92,5 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^\circ\text{C}}$.

Коэффициент теплоотдачи со стороны пара к наружной стенке α_n определяется по формуле (5.13). Расход пара G_n из теплового баланса для пара:

$$Q = G_{\text{п}} r x, \quad (5.24)$$

где Q – расход тепла, Вт; r – удельная теплота конденсации пара, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$; x – степень сухости пара, принимается равной 0,95 (95%).

Расход тепла (тепловая нагрузка аппарата) Q рассчитывается по формуле (5.12).

Так как температура стенки $t_{\text{ст1}}$ заранее неизвестна, то в качестве первого приближения при вычислении $\alpha_{\text{п}}$ принимается $\frac{\text{Pr}}{\text{Pr}_{\text{cm1}}} = 1$. После этого во втором приближении определяется значение $t_{\text{ст1}}$ для теплового потока от пара к стенке из выражения:

$$Q = \alpha'_{\text{п}} F_1 (t_{\text{п}} - t_{\text{ст1}}) \quad (5.25)$$

где F_1 – теплоотдающая поверхность со стороны наружных поверхностей трубок, м^2 ; $\alpha'_{\text{п}}$ – приближенное значение коэффициента теплоотдачи, определяемого по формуле (5.13.) при $\frac{\text{Pr}}{\text{Pr}_{\text{cm1}}} = 1, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$.

После этого вычисляется значение Pr_{cm1} при полученной температуре стенки $t_{\text{ст1}}$ и, наконец, вычисляется более точное значение $\alpha_{\text{п}}$ по уравнению (5.13).

Коэффициент теплоотдачи от внутренней стенки к воде $\alpha_{\text{в}}$ определяется из уравнений (5.15) – (5.17). Здесь также заранее неизвестна температура стенки $t_{\text{ст2}}$, и приходится прибегать к методу последовательного приближения. Предварительно полагается $\frac{\text{Pr}}{\text{Pr}_{\text{ст1}}} = 1$ и рассчитывается первое приближение значения $\alpha'_{\text{в}}$. Далее определяется температура поверхности трубок со стороны воды $t_{\text{ст2}}$ из выражения для потока тепла от стенки к жидкости:

$$Q = \alpha'_{\text{в}} F_2 (t_{\text{ст2}} - t_{\text{в}}^{\text{ср}}) \quad (5.26)$$

где F_2 – теплоотдающая поверхность со стороны внутренних поверхностей трубок, м^2 ; $\alpha'_{\text{в}}$ – приближенное значение коэффициента теплоотдачи, определенного из уравнений (5.15) – (5.17) при $\frac{\text{Pr}}{\text{Pr}_{\text{cm1}}} = 1, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$.

После этого уточняют значение коэффициента теплоотдачи $\alpha_{\text{в}}$.

Для выявления зависимости потерь давления на преодоление гидравлических сопротивлений в аппарате от скорости воды строят график зависимости критерия Эйлера от критерия Рейнольдса $Eu = f(Re)$.

Критерий Эйлера отражает влияние перепада гидростатического давления на движение жидкости и может быть приведен к виду:

$$Eu = \frac{\Delta p}{\rho w^2} = 0,616 \frac{\Delta p d^4}{V^2 \rho} \quad (5.27)$$

где V – объемный расход воды, $\frac{м^3}{с}$.

Для проверки экспериментально измеренных потерь давления на преодоление гидравлических сопротивлений в теплообменном аппарате, производится их расчет по формулам. Рассчитывают потери давления на преодоление водой сопротивления трубного пучка $\Delta p_{тр}$ по формуле (5.19) с учетом зависимостей (5.22) и (5.23).

Рассчитывают потери давления на преодоление местных сопротивлений теплообменного аппарата $\Delta p_{мс}$, по формуле (5.20) и (5.21). Для этого предварительно выявляют места и виды местных сопротивлений по ходу движения воды в аппарате (показывают их на схеме аппарата в отчете) и определяют соответствующие значения коэффициентов местных сопротивлений ζ_i по таблице 5.1.

Далее определяют полные потери давления на преодоление гидравлических сопротивлений в теплообменном аппарате по формуле (5.18) и наносят на график зависимости $Eu = f(Re)$, построенный по экспериментальным данным. Результаты всех расчетов записывают в таблицы 5.3 и 5.4.

Теплофизические параметры воды на линии насыщения приведены в таблице 5.5.

Таблица 5.2

ОПЫТНЫЕ ДАННЫЕ

[illegible]

Таблица 5.3

РАСЧЕТНЫЕ ДАННЫЕ

[illegible]

Таблица 5.4

РАСЧЕТНЫЕ ДАННЫЕ

[illegible]

Таблица 5.5

Теплофизические свойства воды на линии насыщения

Температура, $t, ^\circ C$	Плотность, $\rho, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	Теплоемкость, $c_p, \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^\circ C}$	Теплопроводность, $\lambda \cdot 10^2, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^\circ C}$	Коэф-т температуропроводности, $\alpha \cdot 10^6, \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$	Коэф-т динамической вязкости, $\mu \cdot 10^6, \text{Па} \cdot \text{с}$	Коэффициент кинематической вязкости, $\nu \cdot 10^6, \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$
0	999,9	4,212	55,1	13,1	1788	1,789
10	999,7	4,191	57,4	13,7	1306	1,306
20	998,2	4,183	59,9	14,3	1004	1,006
30	995,7	4,174	61,8	14,9	801,5	0,805
40	992,2	4,174	63,5	15,3	653,3	0,659
50	988,1	4,174	64,8	15,7	549,4	0,556
60	983,2	4,179	65,9	16,0	469,9	0,478
70	977,8	4,187	66,8	16,3	406,1	0,415
80	971,8	4,195	67,4	16,6	355,1	0,365
90	965,3	4,208	68,0	16,8	314,9	0,326
100	958,4	4,220	68,3	16,9	282,5	0,295
110	951,0	4,233	68,5	17,0	259,0	0,272
120	943,1	4,250	68,6	17,1	237,4	0,252
130	934,8	4,266	68,6	17,2	217,8	0,233
140	926,1	4,287	68,5	17,2	201,1	0,217
150	917,0	4,313	68,4	17,3	186,4	0,203

Библиографический список

1. Теплотехника. Техническая термодинамика [Текст] : учеб. пособие для студ. спец. 190601 "Автомобили и автомобильное хозяйство", 190603 "Сервис транспортных и технологических машин и оборудования", 110302 "Электрификация и автоматизация сельского хозяйства", 110301 "Механизация сельского хозяйства", 150405 "Машины и оборудование лесного комплекса", 220301 "Автоматизация технологических процессов и производств", 110300 "Агроинженерия", 150400 "Технологические машины и оборудование", 190500 "Эксплуатация транспортных средств", 280200 "Защита окружающей среды", 280201 "Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов", 250401 "Лесоинженерное дело", 250300 "Технология и оборудование лесозаготовительных и деревообрабатывающих производств", 250403 "Технология деревообработки", 270100 "Строительство" всех форм обучения / М-во образования и науки Рос. Федерации, Сыкт. лесн. ин-т (фил.) ФГБОУ ВПО С.-Петерб. гос. лесотехн. ун-т им. С. М. Кирова, Каф. теплотехники и гидравлики ; сост.: И. Н. Полина, С. Г. Ефимова, Н. А. Корычев. – Сыктывкар : СЛИ, 2012. – 188 с.
2. Теплотехника [Текст] : учеб. для студ. вузов, обучающихся по направлению "Энергомашиностроение" / под ред.: А. М. Архарова, В. Н. Афанасьева. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М. : Изд-во МГТУ, 2004. – 712 с.
3. Ерофеев, В. Л. Теплотехника [Текст] : учеб. для студ. вузов, обучающихся по спец. "Эксплуатация судовых энергетических установок", "Эксплуатация перегрузочного оборудования портов и транспортных терминалов" и "Эксплуатация наземного транспорта и транспортного оборудования" / В. Л. Ерофеев, П. Д. Семенов, А. С. Пряхин. – М. : Академкнига, 2006. – 456 с.
4. Теплотехника [Текст] : учеб. для студ. техн. спец. вузов / под ред. В. Н. Луканина. – 5-е изд., стер. – М. : Высш. шк., 2006. – 671 с.
5. Теплотехника [Текст] : учеб. для студ. вузов, обучающихся по торговому спец. / В. А. Гуляев [и др.]. – СПб. : РАПП, 2009. – 352 с.
6. Круглов, Г. А. Теплотехника [Электронный ресурс] : учеб. пособие для студ. вузов, обучающихся по направлению «Агроинженерия» /

Г. А. Круглов, Р. И. Булгакова, Е. С. Круглова ; Изд-во "Лань" (ЭБС).
– Изд. 2-е, стер. – СПб. : Лань, 2012. – 208 с.

7. Теплотехнический справочник студента [Текст] : учеб. пособие для студ. вузов, обучающихся по специальности 2602 «Технология деревообработки» и 170400 «Машины и оборудование лесного комплекса» / А. Б. Левин, Ю. П. Семенов ; Гос. образовательное учреждение высш. проф. образования, Моск. гос. ун-т леса . – 2-е изд. – М. : МГУЛ, 2005. – 96 с.
8. Техническая термодинамика и теплотехника [Текст] : учеб. пособие для студ. вузов / под ред. А. А. Захаровой. – 2-е изд., испр. – М. : Академия, 2008. – 272 с.