

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Оренбургский государственный университет»

Кафедра теплогазоснабжения, вентиляции и гидромеханики

С.А. САНДАКОВ

И.А. ПИКУЛЕВ

ТЕПЛОТЕХНИКА

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ

Рекомендовано к изданию
Редакционно-издательским советом
государственного образовательного учреждения
высшего профессионального образования
«Оренбургский государственный университет»

Оренбург 2008

УДК 621.74.043

ББК 34.663Я7

С18

Рецензент

доктор технических наук, профессор А.С. Павлов

Сандаков С.А.

**С 18 Теплотехника: методические указания к лабораторным работам
/С. А. Сандаков, И. А. Пикулев - Оренбург: ИПК ГОУ ОГУ, 2008. —
62 с.**

Методические указания предназначены для студентов, изучающих курс теплотехники с выполнением лабораторных работ по указанной дисциплине. Основная цель лабораторного практикума - закрепить теоретические положения курса и ознакомить с методикой проведения несложных теплотехнических экспериментов. В настоящих указаниях пригодятся краткая теория, описание и руководство к выполнению семи лабораторных работ. При подготовке к собеседованию с преподавателем по выполненным лабораторным работам необходимо изучить устройство и принцип действия экспериментальной установки, методику определения искомых величин или зависимостей и освоить основы теории к работе, используя лекционный материал и рекомендуемую литературу по данной дисциплине.

ББК 34.663Я7

© Сандаков С.А.

Пикулев И.А. 2008

© ГОУ ОГУ 2008

Содержание

1 Лабораторная работа № 1 «Определение коэффициента теплопроводности методом плиты».....	4
2 Лабораторная работа № 2 «Определение коэффициента теплопроводности методом цилиндра»	17
3 Лабораторная работа № 3 «Определение коэффициента теплоотдачи для тел цилиндрической формы методом регулярного теплового режима в условиях свободной конвекции»	25
4 Лабораторная работа № 4 «Определение коэффициента теплоотдачи от трубы при вынужденной конвекции»	33
5 Лабораторная работа № 5 «Определение коэффициента лучеиспускания и степени черноты серого тела»	37
6 Лабораторная работа № 6 «Определение времени охлаждения жидкости в теплообменнике при нестационарном теплообмене»	43
7 Лабораторная работа № 7 «Испытание пластинчатого калорифера»	56
8 Литература, рекомендуемая для изучения курса «Теплотехника».....	66

1 Лабораторная работа № 1

«Определение коэффициента теплопроводности методом плиты»

Цель работы: определение коэффициента теплопроводности методом плиты и ознакомление студентов с современными методами и приборами теплофизических измерений, которые широко применяются в исследовательских и промышленных лабораториях.

Целый ряд теплофизических характеристик веществ и материалов, такие как: теплопроводность, теплоемкость и температуропроводность, входят в качестве коэффициентов во все уравнения аналитической теории теплопроводности для количественного расчета тепловых и температурных полей реальных тел. Основным источником информации о конкретных величинах теплофизических характеристик являются различные методики их измерений.

Все нестационарные и стационарные тепловые процессы в твердых телах подчиняются дифференциальному уравнению теплопроводности (уравнение Фурье) в виде:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \nabla^2 t + q \frac{1}{c \cdot \rho} \quad (1.1)$$

где $a = \frac{\lambda}{c\rho}$ - коэффициент температуропроводности, м²/с;

c – массовая удельная теплоемкость тела, кДж/кг·К;

ρ – плотность твердого тела, кг/м³;

$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ – оператор Лапласа в декартовой системе координат;

$q = f(x, y, z, \tau)$ — мощность внутреннего источника теплоты, Дж/м³·с.

В данной лабораторной работе выбран метод теплового воздействия с постоянной мощностью на поверхность исследуемого образца.

Поверхностный источник воздействует на грань образца, создавая через нее постоянный тепловой поток и обеспечивает внутри образца квазиодномерное температурное поле.

В теории теплопроводности рассматриваемые задачи относятся к классу задач с граничными условиями второго рода. При этом наибольший интерес представляет заключительная стадия (стационарная) процесса, при которой все элементы измерительной системы повышают температуру с одина-

ковой поступательной скоростью.

Основу процессов теплопроводности составляет закон теплопроводности (закон Фурье), согласно которому удельный тепловой поток в Локальном сечении пропорционален градиенту температуры:

$$\vec{q} = -\lambda \cdot \text{grad } t \quad (1.2)$$

где λ – коэффициент пропорциональности или коэффициент теплопроводности, Вт/м·К.

Среди веществ наиболее низкой теплопроводностью обладают газы и Неметаллические жидкости. В области умеренных значений температуры наибольшей теплопроводностью обладают металлы и их сплавы.

Отдельную группу составляют полимерные материалы, обладающие сравнительно низкой теплопроводностью.

Являясь характеристикой пространственного переноса температуры, теплопроводность проявляется в условиях заметных Градиентов температурного поля внутри вещества. Главные затруднения при измерении теплопроводности обычно связаны с выделением в исследуемом образце изотермического сечения, в котором было бы возможно, используя комбинированные приемы и аналитические зависимости, с достаточной степенью точности определять температурный градиент и проникающий удельный тепловой поток.

Для обеспечения условий стационарности процесса в лабораторной работе использован метод динамического калорифера, при котором все элементы измерительной системы повышают температуру с одинаковой поступательной скоростью. Тепловая схема метода динамического калорифера представлена на рисунке 1.1.

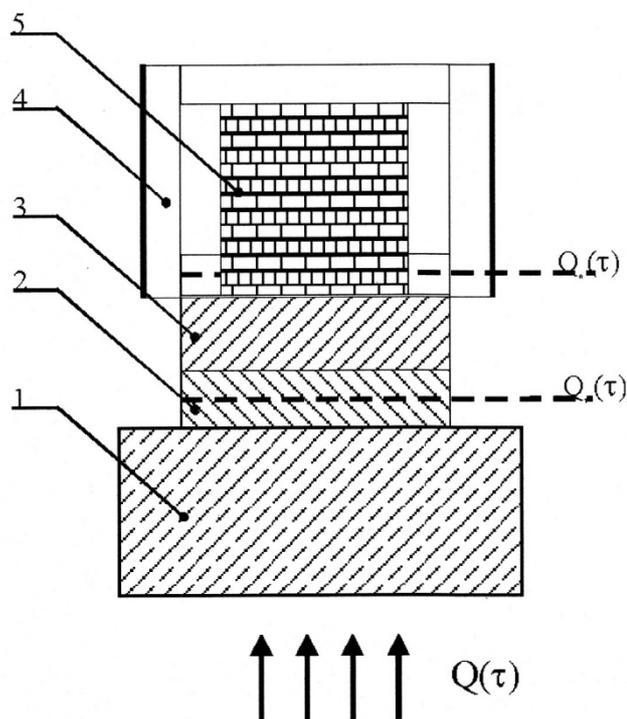


Рисунок 1.1- Тепловая схема метода динамического калорифера

Образец 4, контактная пластина 3 и стержень 5 монотонно разогреваются тепловым потоком, поступающим от основания 1. Боковые поверхности стержня 5, образца 4, пластины 2 и 3 адиабатически изолированы. Стержень 5 и контактная пластина 3 изготовлены из меди, поэтому обладают высокой теплопроводностью – перепад температуры на них незначителен.

Все используемые в экспериментах образцы выполняются цилиндрической формы ($\varnothing 0,015 \pm 3 \cdot 10^{-5}$ м). Высота (H) составляет $5 \cdot 10^{-3}$ м.

Тепловой поток $Q(r)$, проходящий через среднее сечение пластины 2, частично поглощается ею ($Q_T(r)$) и далее идет на разогрев пластины 3, образца 4, где тоже частично поглощается ($Q_0(r)$) и стержня 5. Размеры системы подобраны таким образом, чтобы тепловые потоки, аккумулированные образцом и пластиной, были в 5...10 раз меньше теплового потока, поглощаемого стержнем 5. В этом случае температурное поле образца 4 и пластины 2 оказывается близким к стационарному (линейному, т.к. это пластины). Все детали системы разогреваются с близкими скоростями.

Отсюда тепловой поток, проходящий (для любого уровня температур) через образец и стержень 5 составит, Вт:

$$Q_0(\tau) = \frac{\Delta t_0 \cdot S}{R} = \left(\frac{1}{2} c_0 + c_c \right) \cdot v, \quad (1.3)$$

где Δt_0 – перепад температур на образце, К;

S – площадь поперечного сечения образца, м²;

R – тепловое сопротивление между стержнем и контактной пластиной, м²·К/Вт;

c_0 – полная теплоемкость образца, Дж/К;

c_c – полная теплоемкость меди, Дж/К;

v – скорость разогрева измерительной ячейки, К/с.

Значение теплового потока, проходящего через среднее сечение пластины 2 составит:

$$Q_T(\tau) = K'_T \cdot \Delta t_T = \left(\frac{1}{2} c_T + c_{II} + c_0 + c_c \right) \cdot v, \quad (1.4)$$

где K'_T – коэффициент пропорциональности, характеризующей эффективную тепловую проводимость пластины 2, Вт/К;

Δt_T – перепад температур на пластине 2, К;

c_T – полная теплоемкость пластины, Дж/К;

c_{II} – полная теплоемкость контактной пластины, Дж/К.

Тепловое термическое сопротивление стержня 5 и контактной пластины 3 составит [м²·К/Вт]:

$$R = R_0 + R_K, \quad (1.5)$$

где R_0 – тепловое сопротивление образца, м²·К/Вт;

R_K – тепловое сопротивление контакта, м²·К/Вт.

Тепловое сопротивление образца найдем по формуле:

$$R_0 = \frac{h}{\lambda}, \quad (1.6)$$

где h – толщина (высота) образца, м;

λ – теплопроводность материала образца, Вт/м·К.

Из формул (1.3), (1.4), (1.5) следует, что сопротивление образца R_0 составляет, м²К/Вт:

$$R_0 = \frac{\Delta t_0 \cdot S \cdot (1 + \sigma_c)}{\Delta t_T \cdot K_T} - R_K, \quad (1.7)$$

где σ_c - коэффициент, учитывающий теплоемкость образца;
 K_T - тепловая проводимость пластины 2, Вт/м²·К

$$\sigma_c = \frac{c_0}{2 \cdot (c_0 + c_c)}, \quad (1.8)$$

здесь $c_0 = c'_0 \cdot m_0$, Дж/К.

где c'_0 - удельное (ориентировочно) значение теплоемкости материала образца, Дж/кг·К;

m_0 - масса образца, кг;

$c_c = c'_m \cdot m_c$, Дж/К;

c'_m - удельное значение теплоемкости меди, Дж/кг·К;

m_c - масса стержня 5 г.

Влияние σ_c обычно не превышает 5-10 % и может оцениваться по ориентировочным данным теплоемкости образца.

Значение K_T — тепловой проводимости пластины 2 можно найти по Соотношению, Вт/м²К :

$$\lambda_0 = \frac{h}{R_0} = \frac{h \cdot \Delta t_T \cdot K_T}{S \cdot \Delta t_0 \cdot (1 + \sigma_c) - R_K \cdot \Delta t_T \cdot K_T}, \quad (1.10)$$

Вычисленные значения λ_0 необходимо отнести к средней температуре образца, которая составит:

$$\bar{t}_0 = t_c + 0,5 \cdot A_t \cdot K_T \cdot \Delta t_T \quad (1.11)$$

где t_c - температура, при которой проводилось измерение теплопроводности, °С;

A_t - чувствительность термопары, К/мВ,

K_T - чувствительность гальванометра, мВ-дел;

Δt_{Γ} – перепад температуры на образце, дел.

Описание установки

В состав лабораторной установки входят:

- блок измерительный с измерительной ячейкой;
- блок питания и регулирования;
- гальванометр.

В верхней части измерительного блока размещается корпус блока измерительной ячейки, состоящей из двух частей. Нижняя часть закреплена на горизонтальной плате, верхняя часть – на подъемно- поворотном штанговом механизме. На передней панели блока расположены рукоятки управления и сигнальная лампа регулятора температуры. Блок питания и регулирования обеспечивает нагрев ядра измерительной ячейки со средней скоростью 0,61 К/с и автоматическое регулирование температуры.

Скорость разогрева определяется величиной начального напряжения на нагревателе и скоростью его изменения. Обе эти величины строго фиксированы.

Гальванометр служит для определения периода температур на исследуемом образце и пластине тепломера в процессе непрерывного разогрева.

Основой прибора служит измерительная ячейка (см. рисунок 1.2).

На медном основании 13 размещены термопары 3, пластина 1, контактная пластина 2, составляющие термопар и образец для испытания 12.

Основание 13 и нагревательный блок 14 крепятся в нижней половине блока измерительной ячейки. Охранный колпак 4 крепится в верхней части блока.

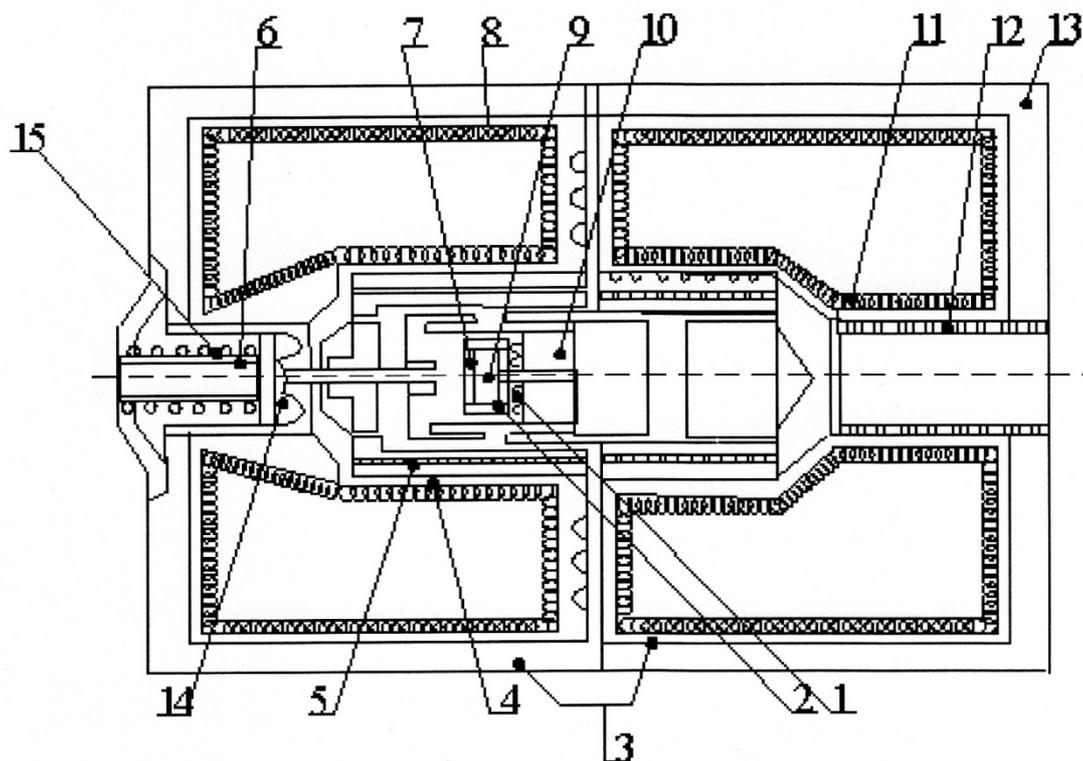


Рисунок 1.2 - Схема измерительной ячейки

1 - пластина, 2 - контактная пластина, 3 - защитный кожух из фольгированного материала, 4 - колпак термоизолирующий, 5 - блок термопар, 6 - стержень, 7 - крышка, 8 - теплоизоляционная оболочка, 9 - образец для исследований, 10 - основание, 11 - блок нагрева, 12 - патрубок, 13 - корпус, 14 - прижим, 15 - пружина

Для температурных измерений использованы хромель-алюминиевые термопары.

Образец для испытаний 9 устанавливается на контактную пластину 2 и сверху поджимается стержнем 6, прижимом 14 и пружиной 15. Термомер смонтирован на медном основании 10. Рабочим слоем термомера является пластина 1 из нержавеющей стали.

Верхняя часть блока измерительной ячейки при смене образца для испытаний имеет возможность подъема и поворота на 90° . Это обеспечивается наличием направляющей и штанги. Для ограничения подъема служит упор.

На передней панели измерительного блока установлен термопарный переключатель B_1 , который имеет 4 положения — « t_c », « n_0 », « n » и «Уст.0».

В положениях « n_0 » и « n » с помощью гальванометра измеряются перепады температур на образце и рабочем слое термомера (в делениях шкалы). В положении «Уст.0» проверяется механический нуль гальванометра. Измерения рассчитаны на определенные значения фиксированной температуры от минус 125°C до плюс 400°C через 25°C . Для получения низких температур предусмотрена возможность охлаждения ядра измерительной ячейки жидким азотом.

На передней панели блока питания и регулирования установлены вольтметр, кнопки, сигнальная лампа и рукоятка для установки начального напряже-

ния. Плавное увеличение напряжения, снимаемого с лабораторного автотрансформатора, обеспечивается электродвигателем через редуктор.

Возвращение движка автотрансформатора в исходное положение осуществляется вручную за счет поворота рукоятки против часовой стрелки с предварительным отжимом на себя.

Подготовка лабораторной установки к работе

1. Проверьте соединения блока и регулирования с измерительным блоком, гальванометра с измерительным блоком.
2. Переведите кнопки «Сеть» и «Нагрев» в положение «Выкл.».
3. Подключите блок питания и регулирования, гальванометр к сети 220В.
4. Установите переключатель «Измерение» в положение «Уст.0».
5. Выключите арретир гальванометра и проведите коррекцию нуля (нуль гальванометра сместите на 50-70 делений влево).

6. Замерьте высоту h и диаметр d образца для испытания ($\theta=0,001$ мм), взвесьте образец ($\pm 0,001$ г).
7. Занесите данные в таблицу 1.1.
8. Поднимите верхнюю половину блока измерительной ячейки.
9. Произведите обезжиривание контактных поверхностей стержня 6, образца 9, контактной пластины тепломера 2 бензином и нанесите тонкий слой смазки (для образцов, впитывающих смазку, можно использовать графитовый порошок или алюминиевую пудру с одновременной градуировкой).
10. Установите образец на контактную пластину тепломера, а стержень на иглы термопары.
11. Опустите верхнюю половину блока измерительной ячейки.
12. Включите блок питания и регулирования кнопкой «Сеть».
13. Установите по вольтметру начальное напряжение 40 В при работе от 25°C.

Порядок проведения эксперимента

Установите переключатель «Измерение» в положение « t_c ». Включите кнопкой «Нагрев» основной нагреватель.

Снимите показания « n_0 » и « n » при достижении каждой из температур, указанных в таблице 1.1 (температура достигнет ожидаемого значения при прохождении светового указателя гальванометра через откорректированную нулевую отметку), проводя переключения рукояткой переключателя «Измерения», запишите показания значения « n_0 » и « n » в таблицу 1.1 и переведите переключатель «Измерение» в положение « t_c ».

Выключите кнопкой «Нагрев» основной нагреватель при достижении верхнего уровня температуры испытаний. Установите переключатель «Измерение» в положение «Уст.0» и проверьте охлаждение блока измерительной ячейки до комнатной температуры. Выключите блок питания и регулирования.

Для определения теплопроводности образца в эксперименте необходимо при различных уровнях температуры (25-400°C) измерять перепады температуры на термометре (Δt_T) и образце (Δt_0) в делениях шкалы гальванометра (n_T , n_0).

Обработка результатов эксперимента

Испытуемый образец: медь (чугун и т.д.) Масса $m = 6,304$ г, $d = 15$ мм, $h = 5$ мм

Таблица 1.1- Результаты наблюдений и расчетов

t_c	n_0	n_t	K_T	$R_K \cdot 10^{-4}$	$R_0 \cdot 10^{-4}$	c_c	σ_c	A_t	t	λ_0
25			0,13	6,88		15,08		24,8		
50			0,15	5,43		15,4		24,5		
75			0,16	4,97		15,5		24,6		
100			0,17	4,41		15,7		24,7		
125			0,17	4,08		15,8		24,8		
150			0,17	4,09		15,8		25,0		
175			0,16	3,85		15,8		25,0		
200			0,16	3,84		15,9		25,0		
225			-	-		16,05		24,9		
250			-	-		16,1		24,8		

Примечание - h - высота исследуемого образца, м; d - диаметр исследуемого образца, м; S - площадь поперечного сечения образца, m^2 ; m - масса исследуемого образца, кг; t_c — температура стержня, °С; n_0, n_t — период температур в делениях шкалы гальванометра; K_T — тепловая проводимость тепломера (характеристика прибора), Вт/К; R_K — контактное тепловое (термическое) сопротивление (характеристика прибора), $m^2 \cdot K / Вт$; R_0 — тепловое сопротивление образца, $m^2 \cdot K / Вт$; c_c — полная теплоемкость стержня (характеристика прибора), Дж/К; σ_c — поправка на теплоемкость образца; A_t — чувствительность термопары, К/мВ; t — средняя температура образца, °С; λ_0 — теплопроводность образца, Вт/м·К.

Расчет коэффициента теплопроводности выполняется в следующей последовательности:

- рассчитайте поправку на теплоемкость образца σ_c по формуле (1.6);
- рассчитайте тепловое (термическое) сопротивление R_0 образца для испытаний по формуле (1.5);
- рассчитайте теплопроводность образца λ_0 по формуле (1.10);
- рассчитайте температуру отнесения измерительного значения теплопроводности t по формуле (1.11).

Сравните полученные значения с известными справочными значениями теплопроводности исследуемого материала.

Отчет по работе должен содержать следующее:

1. Краткое описание работы.
2. Схему измерительной ячейки.
3. Таблицы результатов измерений и выводы.

Таблица 1.2 — Теплофизические свойства исследуемых материалов

Материал	$t, ^\circ\text{C}$	$c, \text{кДж/кг}\cdot\text{К}$	$\lambda, \text{Вт/м}\cdot\text{К}$
Керамика	20	0,8	1,7-2,9
Сталь нерж.	20	0,475	15,00
Железо окислен.	20	0,5	55
АЛЮМ. полиров.	20	0,88	202
Медь (99,998 %)	0	0,3791	390
Органич. стекло	20	1,381	0,196
Кварцевое стекло	20	0,738	1,350
Пенопласт	150	–	0,03-0,08

Контрольные вопросы

1. Определение коэффициента температуропроводности.
2. Что называется температурным полем? Написать его уравнение.
3. Закон Фурье.
4. Вывод дифференциального уравнения теплопроводности.
5. Какими величинами задаются граничные условия первого, второго и третьего рода?
6. По какому закону изменяется температура в однослойной плоской стенке.
7. Теплопроводность многослойной плоской стенки — вывод уравнения.
8. Вывод уравнения теплопроводности через однослойную плоскую стенку.
9. Дайте определение стационарного температурного поля.

2 Лабораторная работа № 2

«Определение коэффициента теплопроводности методом цилиндра»

Цель работы: Углубление знаний по теории теплопередачи, изучение методики экспериментального определения коэффициента теплопроводности материалов и получения навыков исследовательской работы.

Совокупность значений температуры для всех точек пространства в данный момент времени называется температурным полем. Уравнение $t = f(x, y, z, \tau)$ является математическим выражением такого поля. При этом, если температура не меняется во времени, поле называется установившимся (стационарным).

Температура может быть функцией одной, двух и трех координат, соответственно этому поле называется одно-, двух- и трехмерным. Наиболее простой вид имеет уравнение одномерного стационарного температурного поля: $t = f(x)$.

Самопроизвольно теплота переносится только в сторону убывания температуры (по 2-му закону термодинамики). Количество тепла, переносимое через какую-либо изотермическую поверхность (геометрическое место точек, имеющих одинаковую температуру) в единицу времени, называется тепловым потоком Q (Вт). Тепловой поток, отнесенный к единице площади изотермической поверхности, называется плотностью теплового потока q , (Вт/м²).

Изучая процесс теплопроводности в твердых телах, Фурье экспериментально установил, что количество переданной теплоты пропорционально падению температуры, времени τ и площади сечения F , перпендикулярного направлению распространению теплоты.

Математическое выражение этого основного закона теплопроводности (закон Фурье) может быть записано в следующем виде:

$$\delta Q = -\lambda \frac{dt}{dn} dF d\tau, \quad (2.1)$$

Из уравнения (2.1) видно, что интенсивность теплопереноса в твердых телах определяется градиентом температуры и значением коэффициента теплопроводности, который является теплофизическим параметром: он характеризует собой способность материалов проводить тепло.

Для неодинаковых по своей структуре веществ коэффициент теплопроводности различен и зависит от их механических свойств, объемного веса, влажности и температуры.

Для веществ, встречающихся в природе, он изменяется в пределах:

– для газов — $\lambda = (0,005 - 0,5)$ Вт/м °С;

– для капельных жидкостей — $\lambda = (0,08 - 0,7)$ Вт/м °С;

- для строительных и теплоизоляционных материалов – $\lambda = (0,02 - 3,0)$ Вт/м °С;
- для металлов — $\lambda = (20 - 458)$ Вт/м °С.

Как было показано в работе № 1 значение коэффициента теплопроводности материалов, в основном, определяется из опыта.

Наравне с методом плиты для нахождения значения коэффициента теплопроводности материалов широкое применение нашел и так называемый метод цилиндра или метод трубы.

Если исследуемому материалу придается форма цилиндрической поверхности, то его коэффициент теплопроводности также можно найти по уравнению Фурье. Пренебрегая потерям тепла через концы цилиндра, можно считать, что все тепло, выделяемое источником теплоты в виде электрического нагревателя, проходит через цилиндрическую поверхность трубы и определяется уравнением теплопроводности для одномерного теплового потока.

Отсюда, при установившемся тепловом режиме системы все количество теплоты, которое выделяется внутри трубы, проходит через цилиндрический слой исследуемого материала и тогда уравнение теплопроводности (2.1) можно переписать в виде:

$$Q = \frac{2\pi \cdot \lambda \cdot l \cdot (t_1 - t_2)}{\ln \frac{d_2}{d_1}}, \quad (2.2)$$

где λ - коэффициент теплопроводности исследуемого материала, Вт/м·

К; l - длина трубы, м;

d_1 и d_2 - внутренний и наружный диаметры цилиндра, м;

t_1 и t_2 - средние температуры на внутренней и внешней цилиндрической поверхности, °С.

Как и ранее, расчетное уравнение (2.2) справедливо только для установившегося теплового потока.

Выполнение этого условия обеспечивается в опытной установке выбором длины трубы, значительно большей, чем ее внешний диаметр. Кроме того, торцы трубы защищаются тепловой изоляцией, при этом электрический нагреватель равномерно распределяет теплоту по длине трубы, а измерительные термопары установлены ближе к средней части трубы.

Из уравнения (2.2) следует, что коэффициент теплопроводности пропорционален количеству теплоты, участвующему в процессе теплопереноса и обратно пропорционален полному температурному напору.

Если измерить $l, d_1, d_2, t_{ст1}, t_{ст2}$ и w , то из уравнения теплового баланса с учетом (2) можно определить значение коэффициента теплопроводности:

$$\lambda = \frac{Q \ln d_2/d_1}{2 \cdot l \cdot \pi \cdot (t_1 - t_2)}, \quad (2.3)$$

Уравнение (2.3), с учетом того, что вся подведенная электрическая энергия преобразуется в теплоту, можно переписать в более удобном для расчета виде, Вт/м·К:

$$\lambda = \frac{JU \ln d_2/d_1}{2 \cdot l \cdot \pi \cdot (t_1 - t_2)}, \quad (2.4)$$

Полученное из уравнения (2.4) значение коэффициента теплопроводности следует отнести к средней температуре исследуемого материала, которая находится как:

$$t_{\text{ср}} = \frac{t_1 + t_2}{2}, \quad (2.5)$$

Если в результате проведенного эксперимента получено несколько значений коэффициента теплопроводности при разных температурах, то можно построить график зависимости λ от средней температуры исследуемого материала. Для большинства материалов эта зависимость имеет линейный характер.

Описание установки

Изделие цилиндрической формы 1, коэффициент теплопроводности которого следует определить, длиной l и наружным диаметром d (рисунок 2.1) монтируется на рабочем столе. Размеры наружного и внутреннего диаметров изделия d , его длина l указаны на экспериментальном стенде.

Внутри изделия (трубы) размещается электрический нагреватель 2, мощность которого регулируется лабораторным автотрансформатором 9. Токи напряжение, подаваемое на электронагреватель, измеряются с помощью амперметра 3 и вольтметра 4 или ваттметром. Электрический нагреватель рассчитан на мощность, которая позволяет получить температуру стенки трубы не более 300 °С.

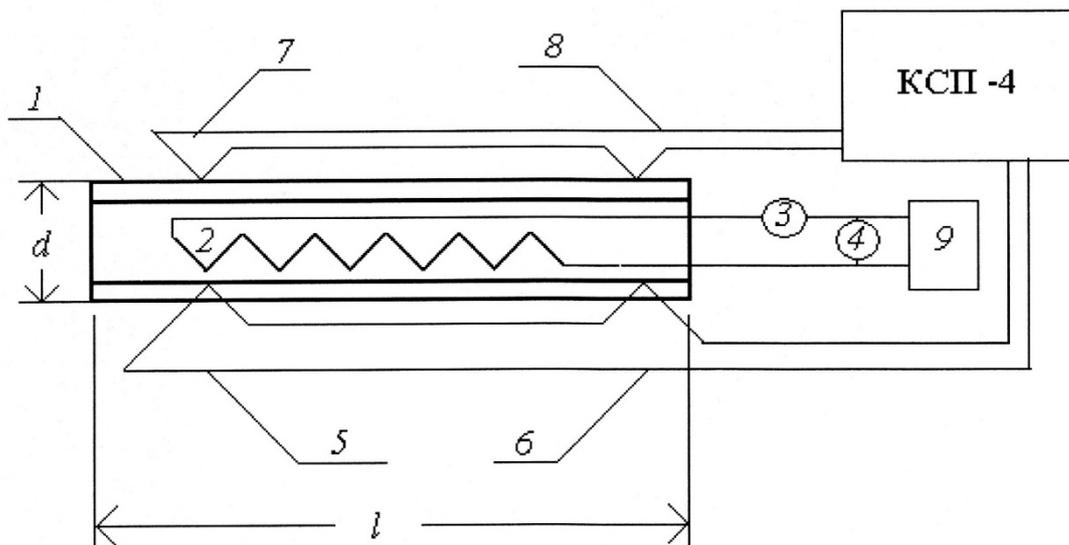


Рисунок 2.1- Схема лабораторной установки

Для измерения температур на внутренней и наружной поверхностях трубы установлены хромель-алюмелевые термопары.

Термопары 5 и 6, расположенные на внутренней поверхности трубы, измеряют температуру $t_{ст1}$. Термопары 7 и 8, расположенные на наружной поверхности трубы, измеряют температуру $t_{ст2}$. Для термостатирования холодного спаа, общего для всех термопар, служит термостат с тающим льдом (сосуд Дьюара).

Электродвижущая сила термопар измеряется с помощью потенциометра типа КСП 4. Термопары подключаются к потенциометру при помощи переключателя.

Перевод значений термоЭДС (мВ), возникающих в термопаре, к температуре на ее рабочем спае, равной температуре в измеряемой точке при $t_{с.с.} = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$, можно произвести по градуировочному графику, имеющемуся на стенде.

Порядок проведения эксперимента

1. Ознакомиться с целью работы и теоретическими основами.
2. Пользуясь схемой установки и ее описанием, ознакомиться с ее устройством, размещением измерительных проборов и регулирующих приспособлений.
3. Включить в сеть 220 В электрический нагреватель, установленный внутри трубы.
4. При помощи лабораторного автотрансформатора установить заданное

напряжение (или мощность) в цепи нагревателя.

5. Через каждые 5-10 минут производить запись показаний измерительных приборов в таблицу наблюдений с тем, чтобы обнаружить наступление стационарного режима, признаком которого является постоянство показаний потенциометра (или милливольтметра) для одних и тех же термодатчиков на протяжении двух-трех замеров при неизменной мощности электрического нагрева исследуемого материала.

6. После достижения установившегося режима опыт прекратить, отключив установку от электрической сети.

ВНИМАНИЕ: Включение и выключение электрического питания установки, равно как и измерение искомых величин, производятся в присутствии и под наблюдением преподавателя или лаборанта кафедры.

Таблица 2.1 – Результаты наблюдений и расчетов

№ наблюдения	J, А	U, В	Q, Вт	$t_{ст2}$ °С	$t_{ст1}$ °С	t_{cp} °С	λ , Вт/м К
1							
2							
-							

Обработка результатов измерений

1. Определить среднюю температуру на поверхности трубы по данным, взятым из таблицы наблюдений для стационарного режима.
2. Аналогично определить среднюю температуру на наружной поверхности трубы.
3. Построить градуировочный график и найти значение $t_{ст1}$ и $t_{ст2}$ в °С, пример построения графика представлен на рисунке 2.2.
4. По данным, взятым из таблицы наблюдений для стационарного режима работы установки, на основе уравнения (2.4) определить коэффициент теплопроводности.
5. Сопоставить значение полученной величины с табличными значениями коэффициента теплопроводности для исследуемого материала.

Получение аналитической зависимости теплопроводности от температуры строится на основе графика $\lambda_j = f(t_j)$, причем по оси абсцисс откладываются значения температур, а по оси ординат - значения теплопроводности. Экстраполируя линию зависимости к температуре $t=0$ получаем на оси ординат значение λ_0 .

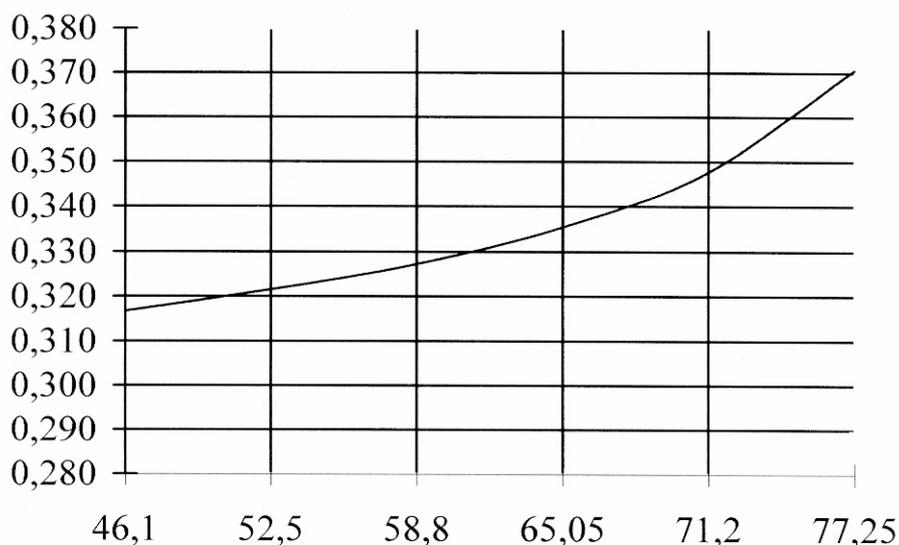


Рисунок 2.2 - Пример построения графика зависимости $\lambda_j=f(t_j)$,

Контрольные вопросы

1. Виды передачи тепла, их физическая сущность.
2. Записать формулу дифференциального уравнения Фурье для определения удельного теплового потока и дать объяснение всем его сомножителям.
3. Что такое температурный градиент? Его аналитическая запись и графическое изображение.
4. Дать формулировку коэффициента теплопроводности, его размерность. От чего зависит этот коэффициент?
5. Записать уравнение Фурье для плоской и цилиндрической поверхностей. Термическое сопротивление теплопроводности плоской и цилиндрической стенок.

6. Записать уравнение теплового баланса в раскрытом виде для установившегося режима лабораторной установки.

7. Что такое установившийся тепловой режим? В чем признак этого режима в данной лабораторной установке?

3 Лабораторная работа № 3

«Определение коэффициента теплоотдачи для тел цилиндрической формы методом регулярного теплового режима в условиях свободной конвекции»

Цель работы: определить опытным путем значение коэффициента теплоотдачи от трубы в условиях свободной конвекции и найти значение коэффициента α в критериальном уравнении.

Коэффициент теплообмена различных тел при вынужденном движении жидкости или газа в условиях естественной конвекции может определяться двумя методами:

- а) методом стационарного теплового потока;
- б) методом регулярного теплового режима.

В условиях установившегося теплового потока коэффициент теплоотдачи α определяется из уравнения Ньютона - Рихмана, Вт/м²*К

$$\alpha_{\text{ср}} = \frac{Q}{F(\bar{t}_{\text{с}} - \bar{t}_{\text{ж}})} \quad (3.1)$$

где Q - тепловой поток, Вт;

F - поверхность теплообмена, м²;

$\bar{t}_{\text{с}}$ - средняя температура поверхности теплообмена, °С;

$\bar{t}_{\text{ж}}$ - средняя температура жидкости или газа, °С.

Определение коэффициента теплообмена методом стационарного теплового потока связано со значительной затратой времени для достижения стационарного режима и материальными затратами на создание экспериментальной установки.

Предложенный проф. Кондратьевым Г.М. метод регуляторного теплового режима дает возможность быстрее и достаточно точно определить коэффициент теплообмена экспериментальным путем.

Между коэффициентом теплообмена и темпом охлаждения существует зависимость в виде уравнения:

$$\bar{b} = \frac{mc_p cV}{F} \quad (3.2)$$

где c_p - теплоемкость тела, Дж/кг С (см. таблицу 3.3); ρ - удельный вес тела, кг/м (см. таблицу 3.3);

V - объем тела, м³;

F - площадь поверхности тела (площадь теплообмена), м²;

m - темп охлаждения, 1/с.

Из уравнения (3.2) следует, что для определения коэффициента теплообмена \bar{b} необходимо найти темп охлаждения исследуемого образца.

Методика определения коэффициента \bar{b} заключается в следующем. Внутри тела, коэффициент теплоотдачи которого нужно определить, закладывают термопару, один спай термопары выводится наружу, другой укрепляется в какой-либо точке (рисунок 3.1).

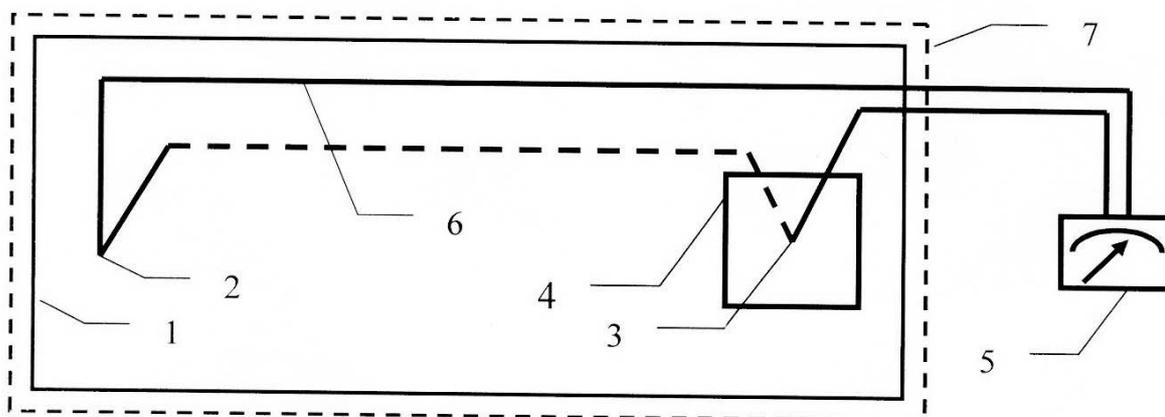


Рисунок 3.1 - Принципиальная схема опытной установки

1- образец, 2 – «горячий» спай термопары, 3 – «холодный» спай термопары, 4 - сосуд Дьюара, 5 - потенциометр или гальванометр, 6 - термопара, 7 - камера спокойного воздуха.

«Холодный» спай термопары 3 погружают в сосуд Дьюара 4 и подключают к гальванометру 5. Образец 1 нагревают до определенной температуры и затем помещают в среду, температура которой ниже температуры образца.

Наблюдая за изменением температуры образца, определяют темп охлаждения, для этого необходимо замерить температуру образца для двух моментов времени: τ_1 и τ_2 . Тогда темп охлаждения может быть найден по формуле, 1/с:

$$m = \frac{\ln \theta_1 - \ln \theta_2}{\tau_2 - \tau_1} \quad (3.3)$$

где θ_1 - разность температур образца и окружающей среды для момента времени τ_1 , определяемая как, °С:

$$\theta_1 = t_{1обр} - t_f \quad (3.4)$$

где θ_2 - разность температур образца и окружающей среды для момента времени τ_2 , определяемая как, °С:

$$\theta_2 = t_{2обр} - t_f \quad (3.5)$$

где t_f - температура окружающей среды, °С.

Имея ряд таких наблюдений строят по точкам график. Этот график, начиная с момента времени τ_1 , представляет собой прямую линию. При этом рассматривается регулярный режим охлаждения. Угловым коэффициентом прямой линии $t_g \varphi$ и есть темп охлаждения m (рисунок 3.2).

По формуле (3.3) определяют темп охлаждения. Затем, выписав из справочника теплофизические свойства материала образца, по уравнению (3.1) определяют коэффициент теплообмена.

После этого необходимо выполнить обработку экспериментальных данных по критериальной зависимости:

$$Nu = c(Gr Pr)^n, \quad (3.6)$$

где Nu - критерий Нуссельта;

Gr - критерий Грасгофа;

Pr - критерий Прандтля.

Критерий Нуссельта находится по формуле:

$$Nu = \frac{\alpha l}{\lambda} \quad (3.7)$$

где α - коэффициент теплообмена, Вт/м² К;

l - характерный размер (для цилиндрических стержней принимается равным диаметру стержня), м;

λ - коэффициент теплопроводности, Вт/м К.

Коэффициент теплопроводности выбирается по таблице 3.3 при температуре окружающей среды.

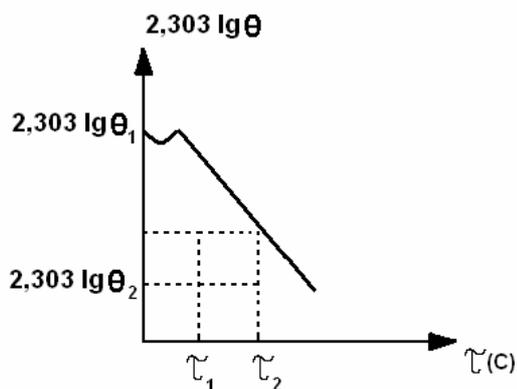


Рисунок 3.2 - График регулярного режима охлаждения

Критерий Грасгофа рассчитывается по формуле:

$$Gr = \beta \frac{gl^3}{\nu_\psi}$$

где g - ускорение силы тяжести, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$;

l - характерный размер (для цилиндрических стержней принимается равным диаметру стержня), м;

ν_{ψ} - коэффициент кинематической вязкости (выбирается по таблице 3.3 при температуре окружающей среды), м²/с;

$\beta = \frac{1}{273 \text{ н}^2}$ - коэффициент объемного расширения воздуха при температуре окружающей среды, °С.

Среднелогарифмический температурный напор определяется по формуле:

$$\Delta t_{\text{лог}} = \frac{\theta_{\text{н}} - \theta_{\text{к}}}{2,31 \lg \frac{\theta_{\text{н}}}{\theta_{\text{к}}}} \quad (3.9)$$

где $\theta_{\text{н}} = t_{\text{н}} - t_{\text{ф}}$ - разность температур образца и воздуха (окружающей среды) в начале опыта, С.

$\theta_{\text{к}} = t_{\text{к}} - t_{\text{ф}}$ - разность температур образца и воздуха в конце опыта, °С.

Критерий Прандтля (Pr) выбирается по таблице 3.3 при температуре окружающей среды.

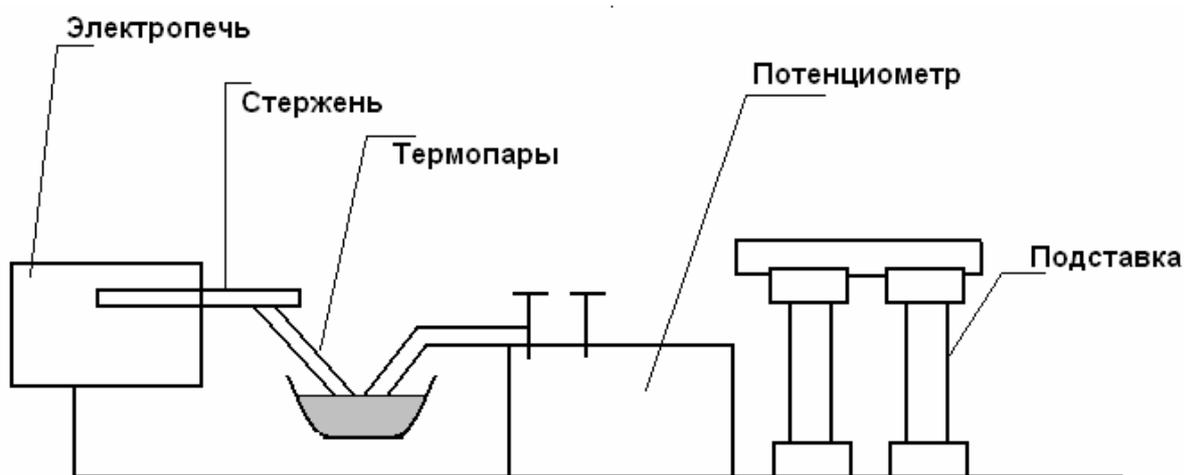
Коэффициент s и показатель степени n определяются после построения графической зависимости.

Порядок проведения эксперимента

1. Включить электропечь и поместить в нее образец.
2. Нагреть образец в электропечи примерно до 300 °С, контролируя температуру по градуировочной кривой.
3. Вынуть образец из печи и установить его на подставку.
4. Измерить одновременно температуру воздуха в помещении на расстоянии от 1 до 1,5 м от образца.

5. Записать показания потенциометра через 0,5 минуты в течение 2 минут и затем через каждые 2 минуты в течение 8-10 минут.
6. Данные опытов записать в таблицу 3.1.
7. Построить графическую зависимость (рисунок 3.2) и определить темп охлаждения.
8. Определить значение коэффициента теплоотдачи a
9. Построить графическую зависимость $Nu = f(Gr Pr)$

Для круглого цилиндра диаметром $d=12$ мм отношение $V/F = 0,003$ м,
 для круглого цилиндра $d = 20$ мм отношение $V/F = 0,005$ м.



Сосуд Дьюара

Рисунок 3.3 - Схема экспериментальной установки

Таблица 3.1- Результаты наблюдений и расчетов

Время, с	Показания потенциометра, мВ	Температура образца, °С	$t_{обp}-t_{\phi}$	$lg \theta$	$2,3 * lg \theta$
1					
2					
3					
4					

Рассчитать по данным двух опытов значения критериев Nu, Gr, Pr и занести их в таблицу 3.2.

Таблица 3.2- Результаты наблюдений и расчетов

№ режима	m	б	Nu	Lg Nu	Gr	Pr	Lg (Gr Pr)
1							
2							

10. По примерному графику (рисунок 3.4) определить значение коэффициента стив критериальной зависимости $Nu = f(Gr Pr)^n$

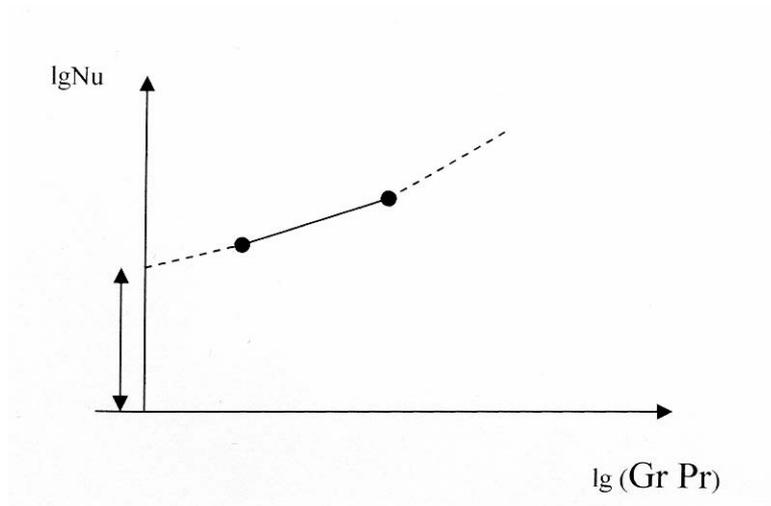


Рисунок 3.4 - Примерный график функции $lg Nu = f(lg Gr, Pr)$

Коэффициент n находится из графика как тангенс угла наклона прямой:

$$n = \operatorname{tg} \varphi = \frac{\lg Nu_2 - \lg Nu_1}{\lg(Gr Pr)_2 - \lg(Gr Pr)_1}$$

Коэффициент c определяется по формуле:

$$c = \frac{Nu}{(Gr Pr)^n}$$

11. Сравнить полученные значения по критериальным уравнениям с известными из литературных источников.

Таблица 3.3 - Физические параметры для сухого воздуха при В = 760 мм рт.ст.

$t, \text{ } ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{ кг/м}^3$	$c_p, \text{ ккал/м.ч.}$	$\lambda \cdot 10^2, \text{ ккал/м.ч.}$	$Q \cdot 10^2, \text{ м}^2/\text{ч}$	$\mu \cdot 10^6, \text{ кг/с.м}^2$	$\nu \cdot 10^6, \text{ м}^2/\text{с}$	Pr
0	1,293	0,240	2,10	6,77	1,75	13,28	0,707
10	1,247	0,240	2,16	7,22	1,80	14,16	0,705
20	1,205	0,240	2,23	7,71	1,85	15,06	0,703
30	1,165	0,240	2,30	8,23	1,90	16,00	0,701
40	1,128	0,240	2,37	8,75	1,95	16,96	0,699
50	1,093	0,240	2,43	9,26	2,00	17,95	0,698
60	1,060	0,240	2,49	9,79	2,05	18,97	0,696
70	1,029	0,241	2,55	10,28	2,10	20,02	0,694
80	1,000	0,241	2,62	10,87	2,15	21,09	0,692
90	0,972	0,241	2,69	11,48	2,19	22,10	0,690
100	0,946	0,241	2,76	12,11	2,23	23,13	0,688
120	0,898	0,241	2,87	13,26	2,33	25,45	0,686
140	0,854	0,242	3,00	14,52	2,42	27,80	0,684
160	0,815	0,243	3,13	15,80	2,50	30,09	0,682
180	0,779	0,244	3,25	17,10	2,58	32,49	0,681
200	0,746	0,245	3,38	18,49	2,65	34,85	0,680
250	0,674	0,248	3,67	24,96	2,79	40,61	0,677
300	0,615	0,250	3,96	25,76	3,03	48,33	0,674

$$\lambda = \frac{\lambda_{\text{табл}}}{10^2} * 1,16 \left[\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}} \right]$$

где $\lambda_{\text{табл}}$ - численное значение коэффициента теплопроводности, взятое из таблицы 3.3.

Теплофизические характеристики образца: $c_p = 518 \left[\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \right]$, $\rho = 7900 \left[\frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right]$

Контрольные вопросы

1. Вывод уравнения теплопроводности через однослойную плоскую стенку.
2. Вывод уравнения теплопроводности через многослойную плоскую стенку.
3. Вывод уравнения теплопроводности через однослойную цилиндрическую стенку.
4. Вывод уравнения теплопроводности через многослойную цилиндрическую стенку.

4 Лабораторная работа № 4

«Определение коэффициента теплоотдачи от трубы при вынужденной конвекции»

Цель работы: определить опытным путем значение коэффициента теплоотдачи от трубы при вынужденной конвекции и найти значение постоянного коэффициента в критериальном уравнении.

Вынужденное движение жидкости или газа широко используется в самых разнообразных теплообменных устройствах. На интенсивность теплообмена в условиях вынужденного движения можно влиять в больших пределах, изменяя скорость движения жидкости или газа.

Процесс обтекания круглой трубы потоком жидкости характеризуется рядом особенностей. Передняя часть цилиндра плавно и безотрывно омывается, а остальная его часть находится в вихревой зоне со сложным циркуляционным течением. В соответствии с таким специфическим характером движения жидкости меняется коэффициент теплоотдачи по окружности трубы. Максимального значения α достигает на лобовой образующей цилиндра, встречающей поток газов, где толщина пограничного слоя является минимальной. В направлении движения жидкости растет толщина пограничного слоя, вместе с ней растет и его тепловое сопротивление, при этом коэффициент теплоотдачи уменьшается. В кормовой части цилиндра вследствие турбулизации среды α вновь увеличивается.

На основании обработки экспериментальных данных для поперечно обтекаемых труб получены следующие формулы (4.1 и 4.2) для среднего по периметру трубы коэффициента теплоотдачи:

$$\text{при } Re_{\text{ж}} < 1 \cdot 10^3, Nu_{\text{ж}} = 0.56 \cdot Re_{\text{ж}}^{0,50} \cdot Pr_{\text{ж}}^{0,36} \cdot (Pr_{\text{ж}} / Pr_{\text{с}})^{0,25} \quad (4.1)$$

$$\text{при } Re_{\text{ж}} < 1 \cdot 10^3, Nu_{\text{ж}} = 0.28 \cdot Re_{\text{ж}}^{0,60} \cdot Pr_{\text{ж}}^{0,35} \cdot (Pr_{\text{ж}} / Pr_{\text{с}})^{0,25} \quad (4.2)$$

Для воздуха зависимости (4.1) и (4.2) упрощаются и принимают вид:

$$\text{при } Re_{\text{ж}} < 1 \cdot 10^3; Nu_{\text{ж}} = 0,49 \cdot Re_{\text{ж}}^{0,50} \quad (4.3)$$

$$\text{при } Re_{\text{ж}} < 1 \cdot 10^3; Nu_{\text{ж}} = 0,245 \cdot Re_{\text{ж}}^{0,50} \quad (4.4)$$

Соотношения (4.3) и (4.4) справедливы при набегании потока жидкости или газа под углом 90 к поверхности.

Описание установки

Схема лабораторной установки приведена на рисунке 4.1.

Установка состоит из трубы 1, в которой встроен электрический нагреватель 2. Мощность электрического нагревателя определяется по показаниям амперметра 3 и вольтметра 4. По длине трубы установлены термопары 5. Измерение ЭДС термопар производится потенциометром 6 типа КСП-4, шкала которого отградуирована в С. Термопары 5 подключаются к КСП 4 с помощью переключателя 7. Мощность, потребляемая электрическим нагревателем 2, регулируется автотрансформатором 8. Воздушный поток, направленный поперек трубы, создается трехрежимным вентилятором 9.

Применяемые приборы: медь-константановые термопары, потенциометр КСП-4, амперметр типа 376, вольтметр Э 378, трехрежимный вентилятор, анемометр типа У-5.

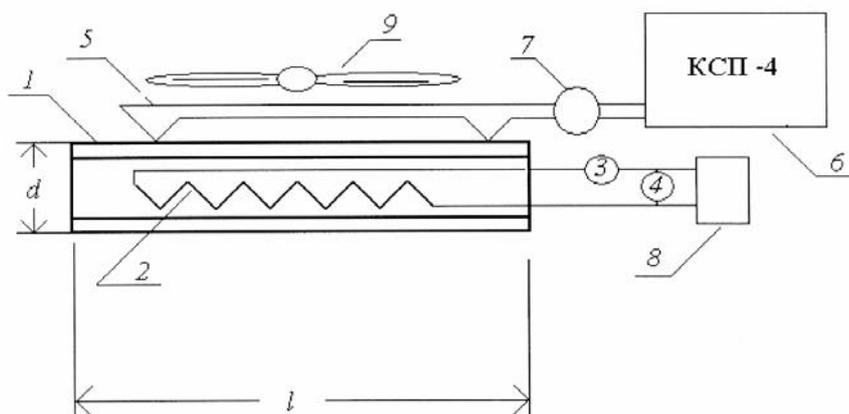


Рисунок 4.1 - Схема лабораторной установки для определения коэффициента теплоотдачи при вынужденной конвекции

Порядок проведения эксперимента

1. Включить установку, установить мощность $W = 100$ Вт и выждать от 15 до 20 минут до наступления стационарного режима.
2. Включить вентилятор на малую производительность и визуально наблюдать за уменьшением температуры поверхности трубы.
3. После наступления стационарного режима произвести измерения температуры поверхности трубы. Осреднить показания термопар и записать полученные значения в таблицу 4.1. Записать показания амперметра, вольтметра и лабораторного термометра.
4. Определить скорость потока ω на оси трубы по скорости вращения крыльчатки анемометра n .
5. Повторить опыт при большей производительности вентилятора.

Таблица 4.1 - Результаты наблюдений и расчетов

№ опы- тов	Измеряемые величины				Определяемые величины			
	n, м/с	t _с , °С	t _в , °С	U, В	ω, м/с	Δt, °С	W, Вт	a, Вт/(м ² К)
1								

Обработка результатов эксперимента

1. Определить мощность, потребляемую нагревателем.
2. Определить коэффициент теплоотдачи по формуле 4.5.

$$\alpha = \frac{W}{\pi \cdot d \cdot l (t_c - t_b)} \quad (4.5)$$

где W=Q – электрическая мощность нагревателя равная тепловому потоку, Вт;

d= 120 мм - диаметр трубы;

l = 770 мм - длина трубы.

Определить значение постоянного коэффициента в критериальных уравнениях (4.3) и (4.4). Полученные значения коэффициента сравнить с литературными данными.

Проанализировать результаты, сделать выводы.

Контрольные вопросы

1. Написать систему дифференциальных уравнений для конвективного теплообмена.
2. Написать систему дифференциальных уравнений для конвективного теплообмена.
3. Из каких дифференциальных уравнений получают числа подобия?

5 Лабораторная работа № 5

«Определение коэффициента лучеиспускания и степени черноты серого тела»

Цель работы: определить коэффициент лучеиспускания и степень черноты серого тела и сравнить полученные значения коэффициента лучеиспускания и степени черноты со справочными данными.

Тепловым излучением (лучеиспусканием) называется явление переноса тепловой энергии в виде электромагнитных волн. Лучеиспускание свойственно всем телам.

Для теплового излучения существует ряд основных законов, одним из которых является закон Стефана-Больцмана. Согласно этому закону количество энергии, излучаемое абсолютно черным телом, пропорционально четвертой степени его абсолютной температуры:

$$E_0 = \sigma_c \cdot T^4 = C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4 \quad (5.1)$$

Величина σ_0 называется константой излучения, а C_0 - коэффициент лучеиспускания. Для абсолютно черного тела коэффициент лучеиспускания равен:

$$C_0 = \sigma_0 \cdot 10^8 = 5.57 \text{ Вт / (м}^2 \cdot \text{К}^4)$$

Коэффициент C_0 не зависит от температуры. Для серых тел коэффициент лучеиспускания меньше коэффициента лучеиспускания абсолютно черного тела ($C < C_0$) и зависит от температуры. Для оценки излучательной

способности серых тел вводится понятие степени черноты поверхности тела E . При одинаковой температуре тел величину E находят по отношению коэффициентов лучеиспускания:

$$E = C_1/C_0 \quad (5.2)$$

Следовательно, степень черноты характеризует собой излучательную способность серого тела C_1 по отношению к излучательной способности абсолютно черного тела C_0 при той же температуре.

Одним из методов определения коэффициента лучеиспускания является метод сравнения теплоотдачи испытуемого тела с теплоотдачей абсолютно черного или серого тела с известной степенью черноты поверхности. Этот метод и использован в данной работе.

В опытной установке взяты два одинаковых по форме, чистоте обработки и размерам тела 1 и 2 (см. рисунок 5.1), имеющих температуру поверхности выше температуры окружающей среды. Они отдают теплоту как путем конвекции, так и путем излучения. В данном случае полное количество энергии, отдаваемое каждым телом окружающей среде, равно сумме количеств теплоты, отдаваемых конвекцией и лучеиспусканием, т.е.:

$$Q_1 = Q_{1к} + Q_{1л} \quad (5.3)$$

$$Q_2 = Q_{2к} + Q_{2л} \quad (5.4)$$

При одинаковых условиях теплообмена и равных температурах поверхностей тел количество теплоты, отдаваемое каждым из тел конвекцией, одинаково: тогда разность полных расходов энергии при установившемся режиме и определяет разность излучательной способности тел, а именно:

В рассматриваемом случае на основании закона Стефана-Больцмана можно записать:

$$Q_1 - Q_2 = (C_1 - C_2) \cdot \left[\left(\frac{T_{пов}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_0}{100} \right)^4 \right] \cdot F \quad (5.6)$$

где C_1 - коэффициент лучеиспускания серого тела ($C_1 = E_1 C_0$), степень черноты E_1 которого известна;

C_2 - коэффициент лучеиспускания серого тела, степень черноты которого неизвестна;

$T_{пов}$ и T_0 - абсолютные температуры поверхности тел и окружающей среды, соответственно, $^{\circ}\text{C}$;

F - излучающая поверхность тел, м^2 .

Из уравнения (5.6) найдем коэффициент лучеиспускания испытуемого твердого тела, который будет равен:

$$C_2 = C_1 - \frac{Q_1 - Q_2}{\left[\left(\frac{T_{пов}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_0}{100} \right)^4 \right] \cdot F} \quad (5.7)$$

Описание установки

Схема лабораторной установки приведена на рисунке 5.1. Установка представляет собой две плоские прямоугольные (круглые) коробки 1 и 2 из алюминиевых пластин, скрепленные по периметру через теплоизоляционную проставку 3. Пластины коробки 1 зачернены. Внутри коробок встроены электрические нагреватели 4. Электрические нагреватели включены в сеть через автотрансформаторы 5 и 6. Потребляемая нагревателями мощность определяется по показаниям амперметров 7 и 9 типа 376 и вольтметров 8 и 10 типа Э 378. В поверхности пластин зачеканены медь-константановые термопары 11 и 12. ЭДС термопар определяются с помощью потенциометра типа КСП-4, шкала которого отградуирована в С. Мощность, потребляемая нагревателями 4, изменяется с помощью автотрансформаторов 5 и 6.

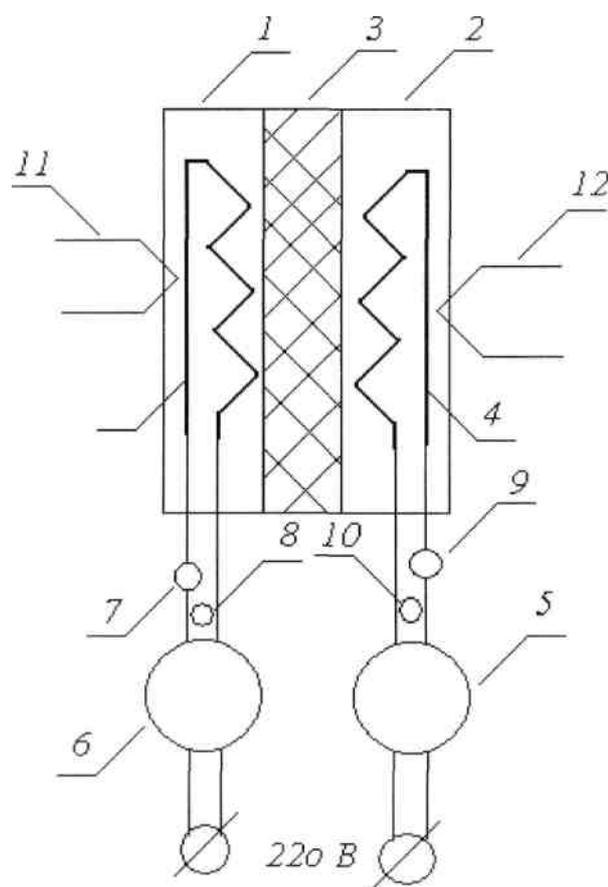


Рисунок 5.1 - Схема лабораторной установки для определения коэффициента излучения.

Порядок проведения эксперимента

Включить установку и прогреть ее минут 15-20, подобрать мощности, потребляемые нагревателями коробок так, чтобы температура их поверхностей I была бы одинаковой. О наступлении стационарного режима судят по неизменности температуры пластин.

Измерить температуру пластин, температуру окружающего воздуха, напряжение и силу тока. Результаты измерений занести в таблицу 5.1.

Обработка результатов эксперимента

По показаниям термопар определить среднее значение температуры поверхности пластин:

$$t_n = \frac{t_{n1} + t_{n2}}{2} \quad (5.8)$$

Определить мощность, потребляемую электрическими нагревателями:

W_1 и W_2

Определить коэффициент лучеиспускания зачерненных пластин, приняв степень черноты для них: $E = 0,95$

Определить коэффициент лучеиспускания серых пластин по формуле (5.7) при условии, что $Q_1=W_1$ и $Q_2=W_2$

$$C_2 = C_1 - \frac{W_1 - W_2}{F_n \cdot \left[\left(\frac{T_{нос}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_0}{100} \right)^4 \right]} \quad (5.9)$$

где $F=2hb$ - суммарная поверхность излучения прямоугольных пластин коробки или $F=\pi d^2/4$ - поверхность излучения круглых пластин. Определить степень черноты серых пластин:

$$E_2 = C_2/C_0 \quad (5.10)$$

Таблица 5.1- Результаты наблюдений и расчетов

№ плас- тины	Размеры		Измеряемые величины				Определяемые величины			
	пластин, в м.		J, А	U, В	$t_n,$ °С	$t_b,$ °С	$t_{n.c.p.},$ °С	W, Вт	E	C
	в	h								
1										
2										

Проанализировать результаты опыта и сделать выводы.

Контрольные вопросы

1. Что называется поглотительной, отражательной и пропускательной способностями?
2. Что называется излучательной способностью тела?
3. Основной закон поглощения.
4. Закон Планка и его графическое изображение.
5. Закон Вина.
6. Закон Стефана-Больцмана.
7. Закон Кирхгофа.
8. Теплообмен излучением между параллельными пластинами.
9. Закон Ламберта. Для каких тел он справедлив?
10. Анализ уравнения закона Кирхгофа.
11. Коэффициент излучения абсолютно черного тела.
12. Что называется интенсивностью излучения?

6 Лабораторная работа № 6

«Определение времени охлаждения жидкости в теплообменнике при нестационарном теплообмене»

Цель работы: экспериментальное определение времени охлаждения жидкости в теплообменнике до заданной конечной температуры; расчет среднего значения коэффициента теплопередачи за период охлаждения; расчет теоретического времени охлаждения жидкости при нестационарном теплообмене.

Теплообменник - устройство, в котором осуществляется теплообмен между двумя или несколькими теплоносителями, либо между теплоносителем и поверхностью твёрдого тела.

По принципу действия теплообменники подразделяют на рекуперативные, регенеративные и смесительные; существуют также теплообменники, в которых нагрев (охлаждение) теплоносителя осуществляется за счёт "внутреннего" источника теплоты (холода).

Целью теплового расчета является определение поверхности теплообмена, а если последняя известна, то целью расчета является определение конечных температур рабочих жидкостей или времени теплообмена.

Основными расчетными уравнениями теплообмена при стационарном режиме являются уравнение теплопередачи и уравнение теплового баланса. Уравнение теплопередачи записывается так:

$$Q = k \cdot F \cdot (t_1 - t_2), \quad (6.1)$$

где Q — тепловой поток, Вт;

k - средний коэффициент теплопередачи, Вт/(м² · С);

F — поверхность теплообмена в аппарате, м²;

t_1 и t_2 - соответственно температуры горячего и холодного теплоносителей, °С.

Уравнение теплового баланса при условии отсутствия тепловых потерь и фазовых переходов приведено ниже:

$$Q - m_1 \Delta t_1 = m_2 \Delta t_2, \quad (6.2)$$

или

$$Q = V_1 \rho_1 \cdot c_{p1} \cdot (t'_1 - t''_1) = V_2 \rho_2 \cdot c_{p2} \cdot (t''_2 - t'_2), \quad (6.3)$$

где V_1 и V_2 - массовые расходы теплоносителей, кг/с;

c_{p1} и c_{p2} - средние массовые теплоемкости жидкостей в интервале температур от t' до t'' , Дж/(кг °С);

t'_1 и t''_1 - температуры жидкостей при входе в аппарат, °С;

t'_2 и t''_2 - температуры жидкостей при выходе из аппарата, °С.

Величина произведения $V \cdot \rho \cdot c_p = W$ (Вт/°С) называется водяным или условным эквивалентом.

С учетом определения условного эквивалента уравнение теплового баланса может быть переписано в следующем виде:

$$(t'_1 - t''_1) / (t''_2 - t'_2) = W_2 / W_1, \quad (6.4)$$

где W_2 и W_1 - условные эквиваленты горячей и холодной жидкостей.

При прохождении через теплообменный аппарат изменяются температуры горячих и холодных жидкостей. На изменение температур большое влияние оказывают схема движения жидкостей и величины условных эквивалентов. На рисунке 6.1 представлены температурные графики для аппаратов с прямоточным движением теплоносителей, а на рисунке 6.2 - для аппаратов с противотоком.

Как видно из рисунка 6.1, при прямотоке конечная температура холодного теплоносителя всегда ниже конечной температуры горячего теплоносителя.

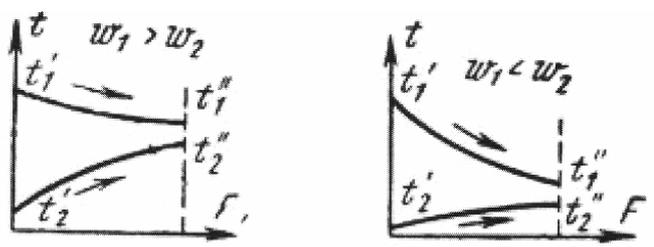


Рисунок 6.1 - Температурные графики для аппаратов с прямотоком

При противотоке (рисунок 6.2) конечная температура холодной жидкости может быть значительно выше конечной температуры горячей жидкости. Следовательно, в аппаратах с противотоком можно нагреть холодную среду, при одинаковых начальных условиях, до более высокой температуры, чем в аппаратах с прямотоком. Кроме того, как видно из рисунков, наряду с изменениями температур изменяется также и разность температур между рабочими жидкостями или температурный напор Δt .

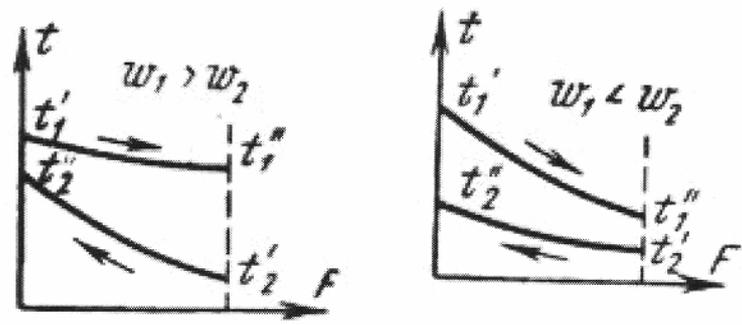


Рисунок 6.2 - Температурные графики для аппаратов с противотоком

Величины Δt и k можно принять постоянными только в пределах элементарной поверхности теплообмена dF . Поэтому уравнение теплопередачи для элемента поверхности теплообмена dF справедливо лишь в дифференциальной форме:

$$dQ = k \cdot dF \cdot \Delta t. \quad (6.5)$$

Тепловой поток, переданный через всю поверхность F при постоянном среднем коэффициенте теплопередачи k , определяется интегрированием уравнения (6.5):

$$Q = \int k \cdot dF \cdot \Delta t = k \cdot F \cdot \Delta t_{cp}, \quad (6.6)$$

где Δt_{cp} - средний логарифмический температурный напор по всей поверхности нагрева.

Для случая, когда коэффициент теплопередачи на отдельных участках поверхности теплообмена значительно изменяется, его усредняют:

$$k_{cp} = (F_1 \cdot k_1 + F_2 \cdot k_2 + \dots + F_n \cdot k_n) / (F_1 + F_2 + \dots + F_n). \quad (6.7)$$

Тогда при $k_{cp} = \text{const}$ уравнение (6.6) примет вид:

$$Q = \int k_{cp} \Delta t \cdot dF = k_{cp} \cdot \Delta t_{cp} \cdot F. \quad (6.8)$$

Если температура теплоносителей изменяется по закону прямой линии (рисунок 6.3, пунктирные линии), то средний температурный напор в аппарате равен разности среднеарифметических величин:

$$\Delta t_{cp} = (t'_1 + t''_1) / 2 - (t''_2 + t'_2) / 2. \quad (6.9)$$

Однако температуры рабочих жидкостей меняются по криволинейному закону. Поэтому уравнение (6.9) будет только приближенным и может применяться при небольших изменениях температуры обеих жидкостей.

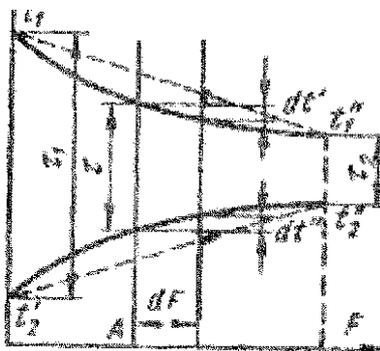


Рисунок 6.3 - Температурные графики для прямоточного теплообменника

При криволинейном изменении температуры величину $\Delta t_{ср}$ называют средне-логарифмическим температурным напором, которая определяется по формулам:

- для аппаратов с прямотоком

$$\Delta t_{ср} = [(t'_1 - t'_2) - (t''_1 - t''_2)] / \ln[(t'_1 - t'_2) - (t''_1 - t''_2)] \quad (6.10)$$

- для аппаратов с противотоком

$$\Delta t_{ср} = [(t'_1 - t''_2) - (t''_1 - t'_2)] / \ln[(t'_1 - t''_2) - (t''_1 - t'_2)] \quad (6.11)$$

Численные значения $\Delta t_{ср}$ для теплообменников с противотоком при одинаковых условиях всегда больше $\Delta t_{ср}$ для аппаратов с прямотоком, поэтому теплообменники с противотоком имеют меньшие габариты.

Теплообменный процесс, в котором температура среды в какой-либо точке изменяется во времени, называется нестационарным. К таким процессам,

например, относится процесс охлаждения жидкости в теплообменнике периодического действия. Охлаждение жидкости может быть осуществлено передачей теплоты от нее к хладагенту, подаваемому в рубашку теплообменника или в змеевик, встроенный в теплообменник.

Одним из основных показателей подобного процесса является время его проведения. Время охлаждения идеально перемешиваемой жидкости в теплообменнике периодического действия (при условии постоянства коэффициента теплопередачи и постоянства расхода хладагента) теоретически может быть рассчитано по уравнению:

$$t = \frac{m_1 \cdot c_{p1}}{m_2 \cdot c_{p2}} \cdot \frac{N}{N-1} \cdot \ln \left(\frac{T_{1,0} - T_{2in}}{T_{1,k} - T_{2in}} \right) \quad (6.12)$$

где m - масса охлаждаемой жидкости; $m \cdot c_p$ -

массовый расход хладагента;

c_{p1} и c_{p2} - удельные теплоемкости соответственно охлаждаемой жидкости и хладагента;

k - коэффициент теплопередачи;

A - площадь поверхности теплопередачи;

$T_{1,0}$ и $T_{1,k}$ - начальная и конечная температуры охлаждаемой жидкости; T_{2in} - начальная температура хладагента.

где $N = \exp \left(\frac{k_t \cdot A}{m_2 \cdot c_{p2}} \right) = const$

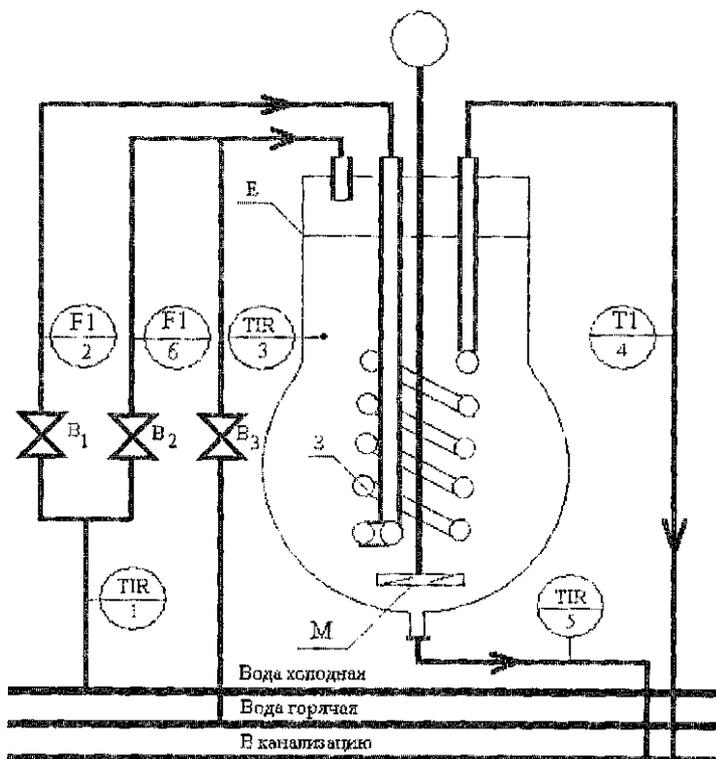


Рисунок 6.4 - Схема лабораторной установки для изучения нестационарного теплообмена в теплообменнике проточного типа

В трубку змеевика подается холодная вода из системы холодного водоснабжения, расход которой регулируется вентилем B_1 и измеряется ротаметром 5.

Работа выполняется на лабораторной установке, представленной на рисунке 6.4.

Основным элементом установки является емкость грушевидной формы, заполненная водой (объем воды V в емкости и средний диаметр заполненной части аппарата рассчитываются), емкость снабжена змеевиком 3, размерами $18,2 \times 1,8$ мм, диаметр витка змеевика $D_{\text{ВИТ}} = 172,5$ мм. Площадь поверхности погруженной части змеевика, определенная по наружному размеру трубки, составляет: $A = 0,3247 \text{ м}^2$. Боросиликатное стекло, из которого выполнен змеевик, имеет теплопроводность $\lambda = 1,14 \text{ Вт/(м К)}$.

Расход воды через ротаметр 5 определяется по формуле:

$$V = 1,68 \cdot 10^{-2} + 8,42 \cdot 10^{-4} S + 1,10 \cdot 10^{-6} S^2 \quad (6.13)$$

где V - объемный расход воды, $\text{дм}^3/\text{с}$;

S — число делений шкалы, обозначенное положением поплавка ротаметра.

Установка снабжена стеклянной лопастной мешалкой M диаметром d_B , вращающейся с частотой n .

Лабораторная установка дополнительно содержит потенциометр типа КСП-4 для измерения и регистрации температуры с помощью термометров сопротивления (позиции 1,2 и 3), установленных соответственно на линии подачи холодной воды, в объеме емкости и на линии сброса воды из емкости в канализацию. Кроме того, на линии выхода воды из змеевика установлен спиртовой термометр (позиция 4).

Изначально вода в емкости, в трубке змеевика и в коммуникациях, имеет температуру помещения.

Подготовка установки к работе

Предварительную подготовку установки к работе необходимо выполнить в следующем порядке:

- открыть на 1- 2 минуты вентиль V_1 и с максимальным расходом пропустить холодную воду через змеевик;

- заполнить горячей водой емкость. Заполнение емкости горячей водой осуществляется при открытом вентиле V_2 путем замещения ею холодной воды, находящейся в емкости;

Для обеспечения равномерного распределения по всему объему поступающей в емкость горячей воды рекомендуется включить привод мешалки M .

При выполнении процедуры заполнения емкости горячей водой, рекомендуется следить за тем, чтобы скорость притока воды не превышала скорости стока.

Необходимо также добиться разогрева воды в сосуде до максимально возможного значения температуры, о величине которой судят по показаниям КСП-4.

По достижении максимальной температуры воды в сосуде перекрыть вентиль V_3 . Если при этом уровень жидкости в емкости превышает исходное значение, определяемое по метке на поверхности емкости, необходимо дождаться стока избытка воды в канализацию. После заполнения емкости горячей водой установка подготовлена к проведению эксперимента.

Порядок проведения эксперимента

1. Включить подачу охлаждающей воды (хладоагента) в змеевик с постоянно заданным расходом.

2. В течение всего эксперимента фиксировать через равные промежутки времени ($\tau = 2$ минуты) температуру:

- воды в емкости (T_{1i}),
- воды на входе в змеевик ($T_{2in,i}$),
- на выходе воды из змеевика ($T_{2out,i}$).

3. Осуществить охлаждение содержимого емкости до конечной температуры $T_{1,k} < 20$ °С. Зафиксировать экспериментальное время охлаждения $\tau_{\text{эксп}}$, кратное 2 минутам.

4. Завершив охлаждение содержимого емкости, закрыть вентиль V_i подачи холодной воды в змеевик, выключить привод мешалки и выключить КСП-4. Результаты измерений и последующих вычислений занести в таблицу 6.1.

Обработка результатов эксперимента

Полученные значения используются для расчета среднего значения коэффициента теплопередачи за период охлаждения и для расчета теоретического времени охлаждения воды при нестационарном теплообмене.

Таблица 6.1 - Результаты наблюдений и расчетов

№ опыта, i	τ_i мин.	$T_{1,i}$ °С	$T_{2\text{ in},i}$ °С	$T_{2\text{ out}, i}$ °С
0				
1				
Средние температуры за период охлаждения				

Расчет коэффициента теплопередачи выполняется по формуле аддитивности термических сопротивлений при переносе теплоты через цилиндрическую незагрязненную стенку, для чего необходимо найти значения коэффициентов теплообмена α_1 и α_H

Расчет коэффициента теплоотдачи от охлаждаемой воды к поверхности теплообменной трубы рекомендуется выполнить в следующем порядке:

а) определить физические свойства охлаждаемой воды при температуре, средней за период эксперимента и средней вдоль поверхности теплообмена. Если найденное при выполнении работы число ячеек идеального перемешивания $n < 2$, то перемешивание жидкости в емкости с работающей мешалкой близко к идеальному.

Принимая идеальное перемешивание охлаждаемой жидкости, то есть полагая, что ее температура не зависит от пространственных координат, а зависит только от времени [$T_1 = f(\tau)$], средняя за период эксперимента температура может быть определена из соотношения:

$$T_1 = \frac{1}{\tau_{\text{эксп}}} \int_0^{\tau_{\text{эксп}}} T_{1,i} d\tau \approx \frac{1}{\tau_{\text{эксп}}} \left[\frac{T_{1,0}}{2} + \sum_{i=1}^{k-1} T_{1,i} + \frac{T_{1,k}}{2} \right] \cdot \Delta\tau \quad (6.14)$$

б) находится число Нусельта (Nu), при этом можно использовать критериальное уравнение вида:

$$Nu = 0.87 Re_M^{0.62} Pr^{0.33} \Gamma(\mu/\mu_s),$$

где M - критерий Рейнольдса при перемешивании;

Pr - критерий Прандля,

$\Gamma = d_B D_{an}$ - симплекс геометрического подобия.

Определяющим линейным размером в вышеприведенных критериальных уравнениях является диаметр мешалки – d_B .

Следует учесть, что температуры поверхности теплообмена не замеряются, поэтому принимаем допущение: $(\mu/\mu_{ст}) = 1$;

в) по формуле (6.16) рассчитывается коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha_1 = \frac{Nu_1 \lambda_1}{d_{\Sigma}} \quad (6.16)$$

Расчет коэффициента теплоотдачи от поверхности теплообменной трубы к охлаждающей воде ($\alpha_2 = \alpha_{вн}$) рекомендуется выполнять в следующей последовательности:

а) определить физические свойства охлаждающей воды при температуре, средней за период эксперимента и средней вдоль поверхности теплообмена.

Температура охлаждающей воды, подаваемой в змеевик, в общем случае, изменяется во времени как в точке входа в змеевик, так и в точке выхода из него.

Средняя за период эксперимента температура воды на входе в змеевик определяется по выражению:

Температура охлаждающей воды, подаваемой в змеевик, в общем случае, изменяется во времени как в точке входа в змеевик, так и в точке выхода из него.

Средняя за период эксперимента температура воды на входе в змеевик определяется по выражению:

$$T_{2in} = \frac{1}{\tau_{\text{эксп}}} \int_0^{\tau_{\text{эксп}}} T_{2in,i} dt \approx \frac{1}{\tau_{\text{эксп}}} \left[\frac{T_{2in,0}}{2} + \sum_1^{i=k-1} T_{2in,i} + \frac{T_{2in,k}}{2} \right] \cdot \Delta\tau \quad (6.17)$$

Средняя за период эксперимента температура воды на выходе из змеевика:

$$T_{2out} = \frac{1}{\tau_{\text{эксп}}} \int_0^{\tau_{\text{эксп}}} T_{2out,i} dt \approx \frac{1}{\tau_{\text{эксп}}} \left[\frac{T_{2out,0}}{2} + \sum_1^{i=k-1} T_{2out,i} + \frac{T_{2out,k}}{2} \right] \cdot \Delta\tau \quad (6.18)$$

Осреднение температуры по длине змеевика может быть выполнено по упрощенному соотношению:

$$T_2 = \frac{T_{2in} + T_{2out}}{2} \quad (6.19)$$

б) рассчитать среднюю скорость воды в трубке змеевика и найти число

Расчет коэффициента теплоотдачи от поверхности теплообменной трубы к охлаждающей воде ($\alpha_2 = \alpha_{\text{вн}}$) рекомендуется выполнять в следующей последовательности:

а) определить физические свойства охлаждающей воды при температуре, средней за период эксперимента и средней вдоль поверхности теплообмена.

Рейнольдса;

в) выполнить расчет критерия Нуссельта, используя одно из приведенных ниже соотношений:

- при числе Рейнольдса, равном:

$$13,5 (d_v/D_{\text{витка}})^{-0,5} < Re < 18500 (d_v/D_{\text{витка}})^{0,28}, \quad (6.20)$$

режим движения жидкости соответствует ламинарному и тогда критерий Нуссельта определяется по уравнению:

$$Nu = 0,0575 Re^{0,75} Pr^{0,43} (d_B/D_{\text{витка}})^{0,21} (Pr/Pr_{\text{ст}})^{0,25} \quad (6.21)$$

при $Re > 18500(d_B/D_{\text{витка}})^{0,28}$ рассматривается турбулентный режим движения жидкости, для которого характерно следующее определение числа Нуссельта:

$$Nu = 0,0266[Re^{0,85} (d_B/D_{\text{витка}})^{0,15} + 0,225(d_B/D_{\text{витка}})^{-1,55}] Pr^{0,4} \quad (6.22)$$

Так как температуры теплообменных поверхностей в данной лабораторной установке не измеряются, можно принять следующее допущение:

$$(Pr/Pr_{\text{ст}})^{0,25} = 1;$$

г) рассчитать коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha_2 = \frac{Nu_2 \lambda_2}{d} \quad (6.23)$$

Далее рассчитывается коэффициент теплопередачи для каждого опыта.

Вычисленные значения коэффициента теплопередачи применяются для расчета теоретического времени охлаждения по формуле (6.12).

В заключении необходимо написать вывод о применимости теоретического расчета к прогнозированию времени охлаждения жидкости в теплообменном аппарате с мешалкой и змеевиком при заданном коэффициенте теплопередачи и при заданных начальной и конечной температурах.

Контрольные вопросы

1. Как определяется средняя температура жидкости?
2. По каким схемам осуществляется движение жидкостей?
3. Основное уравнение теплопередачи и теплового баланса.

7 Лабораторная работа № 7

«Испытание пластинчатого калорифера»

Цель работы: изучение условий работы калорифера, определение коэффициента теплопередачи калорифера и его зависимость от скорости движения теплоносителя

Процессы теплообмена имеют большое значение в химической, энергетической, металлургической, пищевой и других отраслях промышленности. В теплообменных аппаратах теплопередача от одной среды к другой через разделяющую их стенку обусловлена рядом факторов и является сложным процессом.

Калориферами называются теплообменные аппараты, в которых осуществляется нагревание газовой среды в вынужденном потоке.

Калориферы используются для нагрева или охлаждения газовых сред.

Примером их применения являются теплообменники, устанавливаемые в системах воздушного отопления приточной вентиляции, а также для подогрева воздуха перед его подачей в сушильные агрегаты. Греющим теплоносителем является горячая вода или пар.

В последнее время распространены пластинчатые разборные теплообменники-калориферы, отличающиеся интенсивным теплообменом, простотой изготовления, компактностью, малыми гидравлическими сопротивлениями, удобством монтажа и очистки от загрязнений.

Эти теплообменники состоят из отдельных пластин, разделенных резиновыми прокладками, двух концевых камер, рамы и стяжных болтов (см. рисунок 7.1).

Пластины штампуют из тонколистовой стали (толщина 0,7 мм). Для увеличения поверхности теплообмена и турбулизации потока теплоносителя проточную часть пластин выполняют гофрированной или ребристой, причем гофры могут быть горизонтальными или расположены «в елку» (шаг гофры 11,5; 22,5 или 30 мм; высота от 4 до 7 мм).

К пластинам приклеивают резиновые прокладки круглой или специальной формы для герметизации конструкции; теплоноситель направляют либо вдоль пластины, либо через отверстие в следующий канал.

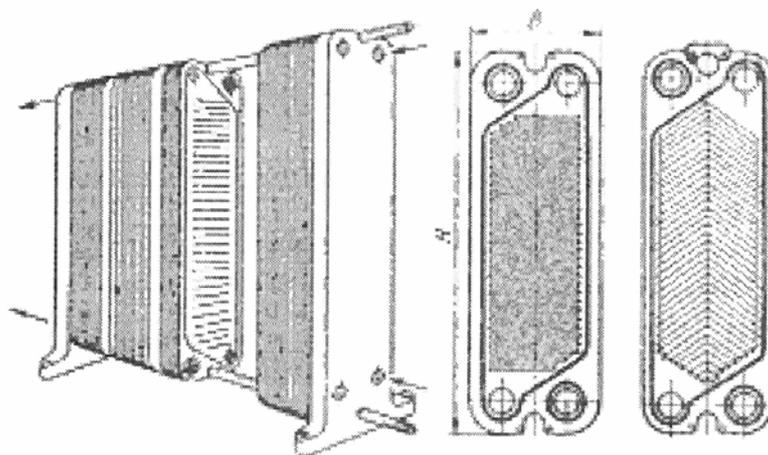


Рисунок 7.1 - Схема пластинчатого теплообменника - калорифера

Движение теплоносителей в пластинчатых теплообменниках может осуществляться прямотоком, противотоком и по смешанной схеме.

Поверхность теплообмена одного аппарата может изменяться от 1 до 160 м², число пластин - от 7 до 303.

В пластинчатых теплообменниках температура теплоносителя ограничивается 150 °С (с учетом свойств уплотнителя), давление не должно превышать 10 кгс/см².

Тепловой расчёт такого типа теплообменников сводится к совместному решению уравнений теплового баланса и теплопередачи.

Тепловой поток, переданный через всю поверхность калорифера при постоянном коэффициенте теплопередачи k , определяется интегрированием уравнения:

$$Q = \int k \cdot dF \cdot \Delta t_{cp} = k \cdot F \cdot \Delta t_{cp}, \quad (7.1)$$

где Δt_{cp} - средний логарифмический температурный напор по всей поверхности нагрева.

Коэффициентом теплопроводности k калорифера называется количество теплоты (в Джоулях), которое передается в единицу времени от теплоносителя воздуху через 1 м² поверхности его нагрева при разности температур в 1 К.

Испытание калорифера производится на установке, схема которой представлена на рисунке 7.2.

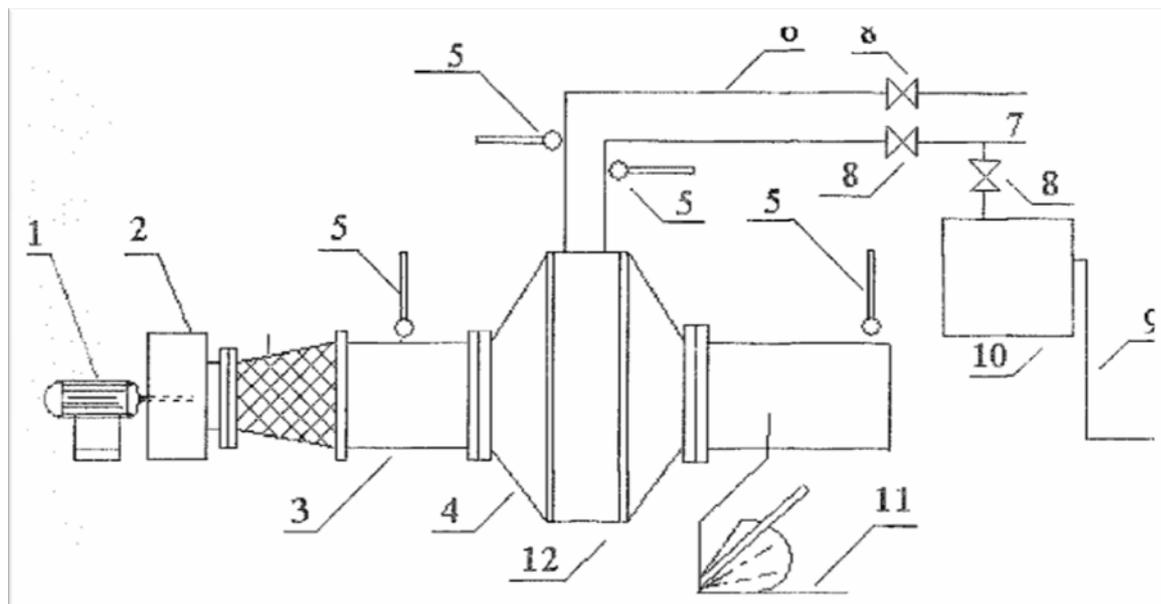


Рисунок 7.2 - Схема лабораторного калорифера

1- электродвигатель, 2- вентилятор, 3 - воздухопровод, 4 - конфузор. 5 - термометры, 6 - подающий трубопровод, 7 — отводящий трубопровод. 8 - вентили, 9 - отводящий трубопровод мерного бака, 10 - мерный бак, 11 - микроманометр, 12 - калорифер.

Исследуемый пластинчатый калорифер 12 установлен на всасывающем воздуховоде 3 центробежного вентилятора типа Ц-4-70 и подсоединен к воздуховоду 3 через конфузор 4. Количество проходящего воздуха через калорифер регулируется шибером, установленном на всасывающем воздуховоде.

В качестве теплоносителя используется вода, которая подается в калорифер по трубопроводу 6 и отводится по трубопроводу 7 в мерный бак 10.

Для определения расхода нагреваемого воздуха пневмометрической трубкой измеряется давление с помощью микроманометра 11 до и после калорифера 12.

Количество теплоносителя определяется по расходу воды в мерном баке 10.

Расчет коэффициента теплопередачи выполняется по формуле:

$$k = \frac{Q}{F \Delta t} \quad (7.2)$$

где Q - количество теплоты, полученное воздухом от теплоносителя, Вт;

Δt - среднелогарифмическая разность температур теплоносителя и воздуха, °С;

F - поверхность нагрева калорифера, м².

Из теплового баланса калорифера определяем количество тепла на подогрев воздуха, Вт:

$$Q = G_B c_{pB} (t_1^1 - t_g) \quad (3)$$

где c_{pB} - средняя удельная теплоемкость воздуха при средней температуре.

кДж/(кг·К) (см. таблицу 7.1);

t_g - температура воздуха на выходе из калорифера, °С;

t_1^1 - температура воздуха на входе в калорифер, °С.

Массовый расход воздуха определяется из выражения, кг/с:

$$G_B = f_{возд} \cdot \rho \cdot \omega \quad (7.4)$$

где $f_{возд} = \pi d^2 / 4$ - площадь воздуховода, м²;

ω - средняя скорость потока воздуха, м/с;

ρ - средняя плотность воздуха до- и после калорифера, м³/кг.

Таблица 7.1 - Теплофизические свойства воздуха

Величина	Температура t , °С							
	0	25	50	75	100	125	150	200
λ Вт/(м К)	0,0244	0,0261	0,0279	0,0302	0,0326	0,0343	0,0361	0,0395
c_p , кДж/(кг·К)	1,0055	1,0055	1,0055	1,0055	1,0056	1,0108	1,0161	1,0265
$\mu \cdot 10^3$, Па·с	0,0171	0,0183	0,0194	0,0206	0,0218	0,0226	0,0234	0,0259

Для определения средней скорости воздуха измеряется динамическое давление до калорифера и после калорифера с помощью пневматической трубки и микроманометра.

Динамическое давление рассчитывается по формуле:

$$P_g = \frac{P_{g1} + P_{g2}}{2} \quad (7.5)$$

или

$$P_g = \rho \frac{\omega^2}{2} \quad (7.6)$$

Используя значение динамического давления из формулы (7.6) находится скорость воздуха:

$$\omega = \sqrt{2 P_g / \rho} \quad (7.7)$$

здесь принято: ρ (кг/м³) = γ (кг/м³) или $\gamma = 0,465 \frac{B}{t + 273}$

где B - барометрическое давление, мм.рт.ст.;

t - средняя температура воздуха до- и после калорифра, °С.

Среднелогарифмическая разность температур теплоносителя и воздуха находится по уравнению:

$$\Delta \bar{t} = \Psi \frac{(t_1 - t_2) - (t_1^1 - t_g)}{[t_1 - t_2]} \quad (7.8)$$

Где Ψ определяется как функция вспомогательных параметров P и R по графику, представленному на рисунке 7.3:

$$P = \frac{t_2 - t_g}{t_1 - t_g} \quad \text{и} \quad R = \frac{t_1 - t_1^1}{t_2 - t_g} \quad (7.9)$$

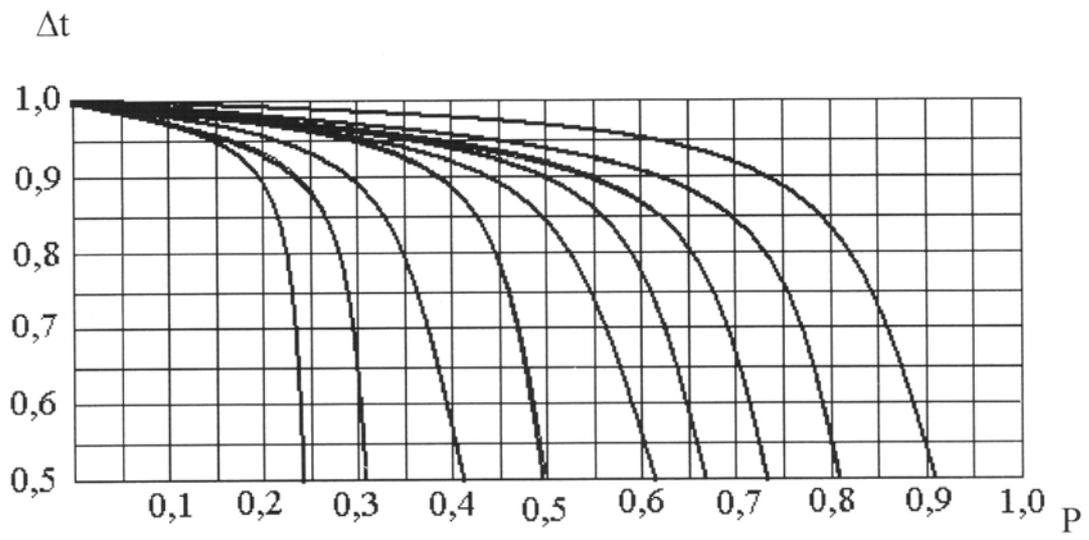


Рисунок 7.3 – График зависимости $\Psi = f(P,R)$

Значение коэффициента теплопередачи, найденное опытным путем, необходимо сравнить со значением, найденным аналитически.

Для пластинчатых калориферов типа КСк4 при теплоносителе - вода коэффициент теплопроводности рассчитывается по следующим зависимостям:

$$k = 12,4(\nu P)^{0.331} \omega^{0.14} \quad \text{при } \omega = 0,03 \dots 0,23 \text{ м/с} \quad (7.10)$$

$$k = 9,5(\nu P)^{0.446} \omega^{0.094} \quad \text{при } \omega = 0,25 \dots 1,00 \text{ м/с} \quad (7.11)$$

где ω - скорость движения воды (м/с) в трубках калорифера, определяемая по уравнению расхода:

$$\omega = \frac{G_{H_2O}}{f_{ж.тр}} \quad (7.12)$$

где $f_{ж.тр}$ - живое сечение трубок калорифера для движения теплоносителя, м².

Расход воды в опыте вычисляется по времени наполнения мерного бака по формуле:

$$G_{H_2O} = \frac{V_{бака}}{1000\tau} \quad (7.13)$$

Массовую скорость воздуха можно рассчитать по формуле:

$$\nu\rho \quad (7.14)$$

где $\nu\rho$ - массовая скорость воздуха, кг/м² с;

$P_{ж.с}$ - с живое сечение калорифера, м²;

ρ - плотность воздуха при $t_{cp} = (t_g + t_1)/2$

Таблица 7.2 - Данные для подбора калориферов типа КСк 4

Массовая скорость движения воздуха во фронтальном сечении (ν_R) кг/(м ² / с)	Коэффициент теплопередачи k , Вт/(м ² °С), при скорости движения теплоносителя по трубкам ω , м/с										Аэродинамическое сопротивление R_a , Па
	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,2	
1,5	24,11	25,73	26,94	27,91	28,72	29,44	30,09	30,66	31,19	32,12	17,68
2	27,79	29,66	31,06	32,18	33,11	33,94	34,7	35,34	35,96	37,03	28,88
2,5	31,05	33,13	34,7	35,94	36,99	37,91	38,76	39,48	40,16	41,37	42,24
3	33,98	36,27	37,98	39,35	40,49	41,5	42,42	43,21	43,96	45,28	57,65
3,5	36,68	39,15	41	42,47	43,71	44,8	45,79	46,65	47,46	48,88	74,97
4	39,21	41,84	43,82	45,39	46,71	47,88	48,94	49,86	50,72	52,24	94,15
4,5	41,57	44,37	56,65	48,13	49,53	50,77	51,9	52,87	53,78	55,39	115,08
5	4,8	46,74	48,96	50,71	52,18	53,49	54,68	55,7	56,66	58,36	137,73
5,5	45,91	49	51,31	53,15	54,7	56,06	57,1	58,38	59,39	61,17	162,03
6	47,94	51,16	53,58	55,5	57,12	58,54	59,84	60,96	62,02	63,88	187,94
6,5	4,87	53,22	55,74	57,74	59,42	60,9	62,26	63,42	64,52	66,45	215,42
7	51,74	55,22	57,83	59,91	61,65	63,19	64,59	65,8	66,94	68,95	244,45

Порядок проведения эксперимента

1. Открыть вентиль 15 и 17 полностью. Вентиль 18 приоткрыть, при этом вентиль 16 находится в закрытом состоянии. Прогреть калорифер в течение 10-15 минут.
2. При закрытом шибере 19 включить вентилятор.
3. Полностью открыть шиберы 5 и 19.
4. Измерить температуру теплоносителя с помощью термометров 11 и 12, измерить температуру воздуха до- и после калорифера при квазистационарном режиме.
5. Измерить динамическое давление с помощью пневмометрической трубки и микроманометра.
6. Закрыть вентиль 17 и выполнить замер времени заполнения мерного бака.
7. С помощью вентиля 18 увеличить расход теплоносителя-воды и повторить замер температуры и расхода воды.
8. Результаты измерений занести в таблицу 7.3.
9. Рассчитать значения коэффициента теплопередачи k .
10. Определить значение k по эмпирическим формулам и сравнить со средним опытным значением k .
11. Построить зависимость k от скорости движения теплоносителя по трубкам калорифера.

Таблица 7.3 - Результаты наблюдений и расчетов

Наименование параметров	Обозначение параметров	Размерность	Опытные данные			
			1	2	3	4
Температура воздуха до калорифера	t_g	$^{\circ}\text{C}$				
Температура воздуха после калорифера	t_1	$^{\circ}\text{C}$				
Температура воды до калорифера	t_2	$^{\circ}\text{C}$				
Температура воды после калорифера	t_3	$^{\circ}\text{C}$				

Наименование параметров	Обозначение параметров	Размерность	Опытные данные			
Средняя разность температур	Δt	$^{\circ}\text{C}$				
Динамическое давление	P_g	Па				
Средняя скорость воздуха	ω	м/с				
Расход воздуха	G_B	кг/с				
Количество тепла полученную воздухом	Q	Дж				
Время наполнения мерного бака	τ	с				
Расход теплоносителя	G_{H_2O}	$\text{м}^3/\text{с}$				
Коэффициент теплопередачи	k	$\text{Вт}/\text{м}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$				

Контрольные вопросы

1. Как изменяются температуры жидкостей и условные эквиваленты в аппаратах?
2. Графики изменения температур рабочих жидкостей в аппаратах с прямотоком и противотоком.
3. Как производится усреднение коэффициента теплопередачи?
4. Как определяется среднеарифметический температурный напор в теплообменном аппарате?
5. Написать уравнения среднелогарифмического температурного напора для аппаратов с прямотоком и противотоком.
6. Как определяются конечные температуры рабочих жидкостей в аппаратах с прямотоком, противотоком и поперечным током?
7. Основное уравнение теплопередачи и теплового баланса.

8 Литература, рекомендуемая для изучения курса «Теплотехника»

1. Теплотехника: учебник для вузов / под общ. ред. В.Н. Лукамина - М.: Высшая школа, 2008.- 671 с.
2. Нащокин В.В. Техническая термодинамика и теплопередача / В.В. Нащокин - М.: Высшая школа, 1980.-469 с.
3. Алексеев Г.Н. Общая теплотехника / Т.Н. Алексеев - М.: Высшая школа, 1980.-552 с.
4. Теплотехника: учебник для вузов / под общ. ред. А.М. Архарова. В.Н. Афанасьева.- М: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004.- 712 с.
5. Лариков Н.Н. Теплотехника / Н.Н. Лариков - М.: Изд-во Стройиздат, 1985.-432 с.
6. Лабораторный практикум по термодинамике и теплопередаче / под общ. ред. В.И. Крутова и Е.Б. Шишова. -М.: Высшая школа, 1988.-216с.
7. Теплофизические измерения и приборы / Шатунов Е.С. [и др.]; под общ. ред. Е.С. Платунова - Л.: Изд-во Машиностроение, 1986.- 256с.
8. Кириллин В.А. Исследования термодинамических свойств веществ / В.А. Кириллин, А.Е. Шейндлин. - М.: Изд-во Энергоиздат, 1963.-560с.
9. Вукалович М.П. Термодинамические свойства воды и водяного пара/ М.П. Вукалович.- М.: Изд-во Энергоиздат, 1958.- 128с.
10. Сборник задач по технической термодинамике / Т.Н. Андрианова. Б.В. Дзампов, В.Н. Зубарев, С.А. Ремизов.- М.: Изд-во Энергоиздат, 1981. - 240 с.