

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФГБОУ ВО «Кубанский государственный
аграрный университет имени И. Т. Трубилина»

ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА

Практикум

Краснодар
КубГАУ
2020

УДК 621.1.016 (075.8)

ББК 31.3

С54

Р е ц е н з е н т :

А.М. Смаглиев – канд. техн. наук, доцент
(Кубанский государственный технологический
университет)

Соболь А.Н.

С54 Техническая теплотехника: практикум / А. Н. Соболь. –
Краснодар. - КубГАУ, 2020. – 84 с.

В практикуме даны описания лабораторных работ по разделам
технической теплотехники.

Практикум предназначен для студентов высших учебных заведений
очной и заочной формы обучения, осваивающих образовательные про-
граммы по специальности 08.05.01 «Строительство уникальных зданий и
сооружений» со специализацией «Строительство высотных и большепро-
летных зданий и сооружений»

УДК 621.1.016 (075.8)

ББК 31.3

© Соболь А.Н., 2020

© ФГБОУ ВО «Кубанский
государственный аграрный
университет имени
И. Т. Трубилына», 2020

ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Лабораторные работы по дисциплине «Теплотехника» являются ответственным этапом в изучении курса теплотехники в частности технической термодинамики.

Отчет оформляется следующим образом:

- на 1 странице «Отчет по лабораторной работе № __», далее «Выполнил: И.О. Фамилия» и «Проверил: И.О. Фамилия»;
- на 2 странице пишется цель работы, основные теоретические положения, и расчетные формулы с пояснениями;
- на 3 странице приводится схема экспериментальной установкой;
- на 4 странице – итоговая таблица экспериментальных и расчетных данных;
- на 5 странице приводятся экспериментальные и расчетные графики.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1

«ОПРЕДЕЛЕНИЕ СРЕДНЕЙ ТЕПЛОЕМКОСТИ ВОЗДУХА»

1 ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Экспериментальное определение средней объемной теплоемкости в процессе при постоянном давлении.

2 ЗАДАНИЕ

2.1 Определить с помощью экспериментальной установки среднюю объемную теплоемкость воздуха при постоянном давлении в интервале температур от комнатной до 50°C.

2.2 Вычислить средние массовые и молярные теплоемкости воздуха в процессах при $P=const$ и $V=const$ и сопоставить их с табличными данными.

2.3 Рассчитать средний показатель адиабаты для воздуха.

2.4 Определить с помощью полученных теплоемкостей изменение энтальпии и внутренней энергии в процессе при постоянном давлении. Вычислить работу, процесса, составить энергетический баланс процесса.

3 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Сообщение телу теплоты в каком-либо процессе вызывает изменение его состояния, в частности, температуры. Поэтому о количестве подведенной энергии в форме теплоты можно судить по изменению температуры, т.е. $\Delta Q = C dT$. Отношение количества теплоты ΔQ , сообщаемой телу при бесконечно малом изменении его состояния, к соответствующему изменению температуры dT называют истинной теплоемкостью тела

$$C = \frac{\Delta Q}{dT} \quad (1)$$

Теплоемкость, отнесенную к единице количества вещества, т. е. к единице массы (1 кг) тела, называют удельной теплоемкостью (c), Дж/(кг · К);

$$c_x = \left(\frac{dq}{dt} \right)_x$$

В общем случае истинная теплоемкость, где через x обозначен тот параметр, который сохраняется постоянным в данном процессе.

Теплоемкость зависит от температуры. При небольшом пределе изменения температуры, а также в приближенных расчетах зависимостью теплоемкости от температуры пренебрегают и принимают ее усредненное постоянное значение в данном интервале температур. Теплоемкость тела, соответствующую изменению температуры на конечную величину $\Delta t = t_2 - t_1$, называют средней теплоемкостью данного процесса

$$c_T \Big|_{t_1}^{t_2} = \frac{q_{1-2}}{t_2 - t_1} \quad (2)$$

где q_{1-2} – количество теплоты, подведенной к 1 кг, 1 м³ или киломолю вещества в данном процессе.

В зависимости от способа задания единицы количества вещества различают теплоемкость массовую, объемную и мольную.

Теплоемкость 1 кг газа или пара называется массовой и обозначается $c \Big|_{t_1}^{t_2}$ кДж/(кг·К)

Теплоемкость 1 м³ газа или пара, отнесённого к нормальным физическим условиям НФУ, называется объемной и обозначается c' или $c' \Big|_{t_1}^{t_2}$, кДж/(м³·К)

Теплоемкость 1 киломоля газа или пара называется мольной и обозначается μc_x или $\mu c_x \Big|_{t_1}^{t_2}$ кДж/(кмоль·К) Между этими теплоемкостями существует зависимость

$$c_x = c'_x \cdot V_0 = \frac{\mu c_x}{\mu}, \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) \quad (3)$$

где V – удельный объем газа или пара при НФУ, $\text{м}^3/\text{кг}$.

Связь между истинной теплоемкостью c_x в данном процессе и средней устанавливается соотношением

$$c_{\text{хт}} \Big|_{t_1}^{t_2} = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} c_x dt \quad (4)$$

Обычно средние теплоемкости в таблицах даются в интервале температур от 0 до t °С, тогда средняя теплоемкость $c_{\text{хт}} \Big|_{t_1}^{t_2}$ в заданном интервале температур t_1 , t_2 может быть определена следующим образом:

$$c_{\text{хт}} \Big|_{t_1}^{t_2} = \frac{c_x \Big|_0^{t_2} \cdot t_2 - c_x \Big|_0^{t_1} \cdot t_1}{t_2 - t_1} \quad (5)$$

4 МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

В основе экспериментального исследования лежит метод проточного калориметра.

Изменение теплоемкости невозможно производить в калориметре непроточного типа, так как масса исследуемого газа, заполняющего калориметр, получается небольшой и при подведении к ней теплоты большая часть ее уходит на тепловые потери и нагревание деталей калориметра. В проточном калориметре этих потерь меньше, так как в единицу времени прокачивается значительная масса газа, разогрев установки не учитывается и измерения проводит при стационарном режиме.

Расчетное уравнение для определения средней объемной теплоемкости воздуха при постоянном давлении может быть записано следующим образом

$$c_p \Big|_{t_1}^{t_2} = \frac{3,6Q}{V_0 \Delta t}, \text{ кДж/(м}^3 \cdot \text{К)} \quad (6)$$

где Q – тепловой поток, подводимый к воздуху, Вт,

Δt – разность температур на входе и выходе в калориметр, °С;

V_0 – расход воздуха через калориметр, приведенный к нормальным физическим условиям, м³/ч.

5 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Основными элементом экспериментальной установки является проточный калориметр (рисунок 1). Он состоит из стеклянной трубки, в которой смонтирован электронагреватель 5. Для уменьшения потерь теплоты в окружающую среду колориметр окружен стеклянной оболочкой 4. Воздух из пространства между колориметром и оболочкой удален.

Постоянный расход воздуха через колориметр создается пылесосом 2. Исследуемый воздух засасывается из помещения лаборатории, проходит через ротаметр 3 и пылесосом выбрасывается наружу. Температура на выходе замеряется с помощью хромель-алюмелевой термопары 1. Термопара подключается к милливольтметру.

Установка подключена к сети с напряжением 220 В. Сила тока в цепи электронагревателя измеряется амперметром, напряжение на зажимах электронагревателя регулируется регулятором напряжения 6 и измеряется вольтметром.

6 ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

6.1 Выписать в бланк отчета по лабораторной работе цель работы, задание, краткую методику проведения эксперимента. Заготовить таблицу для записей показаний прибора.

6.2 Включить пылесос и электронагреватель. Установить заданное преподавателем напряжение для проведения первого режима.

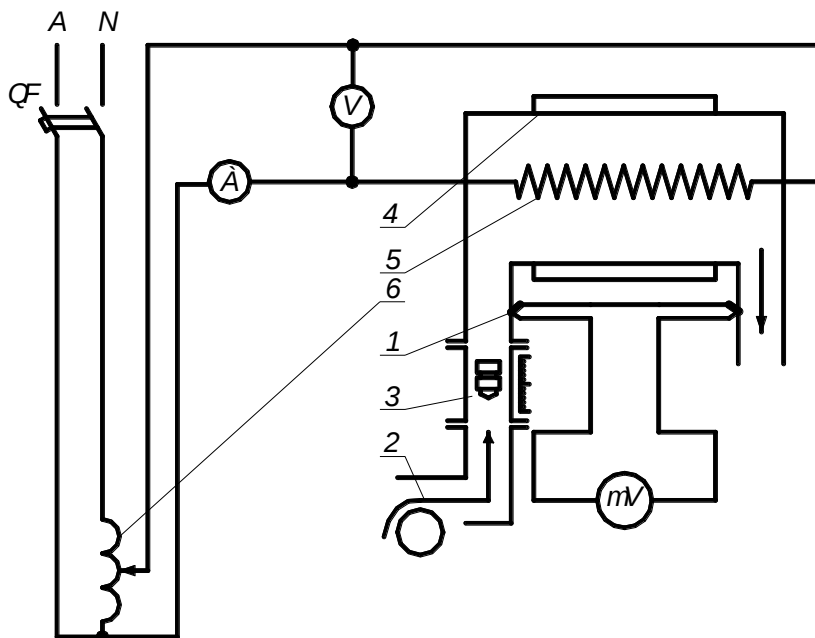


Рисунок 1 – Установка для определения средней теплоемкости воздуха

6.3 После достижения стационарного режима, о наступлении которого судят по постоянству положения стрелки милливольтметра (по истечении 4-5 минут), измерить показания воздуха по показаниям амперметра и вольтметра. С помощью милливольтметра сделать три замера термопары с интервалом в 3 минуты с записью значения в таблицу 1. Измерить температуру окружающего воздуха с помощью ртутного термометра.

6.4 Увеличить мощность электродвигателя через 5 минут произвести измерения на втором стационарном режиме.

Таблица 1 – Показания приборов и обработка экспериментальных данных

Режим	Повторность	Сила тока I, А	Напряжение U, В	Тепловой поток Q, Вт	Температура на входе t ₁ , °С	Температура на выходе t ₂ , °С	Расход		Теплоемкость		
							л/мин	м ³ /ч	$C_p \Big _{t_1}^{t_2}$ $\frac{\kappa Дж}{м^3 \cdot K}$	$C_p \Big _{t_1}^{t_2}$ $\frac{\kappa Дж}{кг \cdot K}$	$C_v \Big _{t_1}^{t_2}$ $\frac{\kappa Дж}{кг \cdot K}$

7 ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

7.1 С помощью градуированной таблицы термопар по значению термо-э.д.с. определить разность температур воздуха на выходе и входе в калориметр холодный спай термопары находится при температуре окружающего воздуха, а рабочий на выходе из колориметра подогретого воздуха.

7.2 Вычислить объем воздуха, приведенного к нормальным физическим условиям

$$V_0 = V_T \cdot \frac{P_T}{P_0} \cdot \frac{T_0}{T_T}, \text{ (м}^3\text{/ч)} \quad (7)$$

где V_T – объем воздуха, проходящий через калориметр, замеренный с помощью ротаметра в относительных единицах и переведенный в м³/ч с помощью тарифовочного графика;

P_0 , T_0 – давление и температура при нормальных физических условиях

$$P_0 = 760 \text{ мм рт. ст. ; } T_0 = 273 \text{ К}$$

$P_T=751,5$ мм рт. ст. ; $T_T=290,45$ К-давление и температура, при которых был получен тарифовочный график.

7.3 Вычислить среднюю объемную теплоемкости, по формуле (6), принимая тепловой поток равным мощности электронагревателя $Q=I \cdot U$, Вт.

7.4 Определить величину средней массовой теплоемкости при постоянном давлении

$$c_p \Big|_{t_1}^{t_2} = \frac{c_p \Big|_{t_1}^{t_2} \cdot 22,4}{\mu}, \text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) \quad (8)$$

где 22,4 – объем киломоля идеального газа при НФУ, м³/моль;

μ – масса киломоля. Для воздуха $\mu=28,97$ кг/моль

7.5 Рассчитать среднюю массовую теплоемкость при постоянном объеме в том же интервале температур. Так как в данном случае воздух по своим свойствам весьма близок к. идеальному газу, то связь; между теплоемкостями выражается формулой Майера

$$c_v \Big|_{t_1}^{t_2} = c_p \Big|_{t_1}^{t_2} - R, \text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) \quad (9)$$

где R-газовая постоянная для воздуха, $R=0,287$ кДж/(кг·К).

7.6 Вычислить величину показателя адиабаты для воздуха

$$k = \frac{c_p \Big|_{t_1}^{t_2}}{c_v \Big|_{t_1}^{t_2}} \quad (10)$$

7.7 Определить изменение энтальпии воздуха в процессе при постоянном давлении

$$\Delta i = c_p \Big|_{t_1}^{t_2} (t_2 - t_1), \text{кДж}/(\text{кг}) \quad (11)$$

Численно Δi равно количеству теплоты, подведенной к каждому килограмму воздуха в изобарном процессе, т.е.

$$Q_p = \Delta i_{1-2}$$

7.8 Вычислить изменение внутренней энергии воздуха в данном процессе

$$\Delta u = c_v \Big|_{t_1}^{t_2} (t_2 - t_1), \text{кДж/(кг)} \quad (12)$$

7.9 Рассчитать работу газа в изобарном процессе.

$$l = R(T_2 - T_1) \text{ кДж/кг.}$$

7.10 Составить энергетический баланс процесса $q = \Delta u + l$ кДж/кг. Определить невязку в процентах.

ОТЧЕТ ПО РАБОТЕ

Отчет о выполненной работе должен содержать:

- 1 Цель работы, задание.
- 2 Методику экспериментального определения теплоемкости.
- 3 Рисунок 1 и таблицу 1.
- 4 Обработку результатов эксперимента с необходимыми расчетами.
- 5 Сопоставление результатов эксперимента с табличными данными.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дать определение массовой, объемной и мольной теплоемкостей.
2. Какой объем газа имеют ввиду, говоря об объемной теплоемкости? В каких единицах измеряются теплоемкости?
3. Какая функциональная зависимость положена в основу изменения теплоемкости от температуры? Показать графически зависимость теплоемкости от температуры.
4. Что такое истинная теплоемкость?
5. Дать определение средней теплоёмкости.
6. Написать уравнение количества теплоты через среднюю теплоемкость.

7. Как определить, среднюю теплоемкость в интервале от t до t пользуясь таблицами теплоемкостей от 0 до t градусов Цельсия?
8. Что такое теплоемкость при постоянном объеме и теплоемкость при постоянном давлении?
9. Почему, теплоемкость газа при постоянном давлении всегда больше теплоемкости при постоянном объеме?
10. Какая связь между теплоемкостями при подводе теплоты к газу при постоянном давлении и постоянном объеме? Объяснить смысл всех величин, входящих в уравнение Майера.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2 **«ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА** **ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ СЫПУЧЕГО МАТЕРИАЛА»**

1 ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является экспериментальное определение коэффициента теплопроводности материала методом трубы.

2 ЗАДАНИЕ

2.1 Определить экспериментально коэффициент теплопроводности для двух стационарных режимов.

2.2 Найти аналитическую зависимость коэффициента теплопроводности от температуры.

3 ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Явление теплопроводности представляет собой процесс распространения тепловой энергии, при непосредственном соприкосновении отдельных частиц тела или отдельных тел, имеющих различные температуры. Теплопроводность обусловлена движением микрочастиц вещества. При этом в газах перенос энергии осуществляется путем диффузии молекул и атомов, а в жидкостях и в твердых телах – диэлектриках путем упругих волн, в металлах – путем диффузии свободных электронов. Согласно основному закону теплопроводности – закону Фурье плотность теплового потока (количество теплоты, прошедшее в единицу времени через единицу изотермической поверхности) прямо пропорциональна градиенту температур.

$$q = -\lambda \text{grad} t, \text{ Вт/м}^2 \quad (1)$$

где λ – коэффициент пропорциональности, называемый коэффициентом теплопроводности, Вт/(м·К), который является физическим параметром вещества, характеризующим его способность проводить теплоту. Численно коэффициент теп-

лопроводности равен количеству теплоты, проходящему в единицу времени через единицу изотермической поверхности при условии $\text{grad}t=1$.

Температурный градиент является мерой интенсивности изменения температуры в направлении по нормали к изотермической поверхности. Направлен он в сторону возрастания температуры. Численно равен производной от температуры по этому направлению

$$\text{grad}t = \lim \left(\frac{\Delta t}{\Delta n} \right) = \frac{dt}{dn} \quad (2)$$

Знак минус в законе Фурье указывает на то, что теплота передается в направлении уменьшения температуры.

4 МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

При определении коэффициента теплопроводности материалов методом трубы исследуемому материалу придают форму цилиндрического слоя. При стационарном тепловом режиме коэффициент теплопроводности определяется из формулы теплового -потoka, полученной из закона Фурье для цилиндрической стенки

$$\lambda = \frac{Q \cdot 2.3Lg(d_2 / d_1)}{2\pi L(t_{c1} - t_{c2})}, \text{Вт/(м} \cdot \text{К)} \quad (3)$$

где l – длина трубы, м;

λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);

d_2, d_1 – внутренний и наружный диаметры цилиндрического слоя материала, м;

t_{c1}, t_{c2} – средние температуры внутренней и наружной поверхности слоя материала, °С.

5 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Исследуемый материал 4 (рисунок 2) (кварцевый песок) находится, в пространстве между трубами 2 и 3. Во внутренней трубе расположен электронагреватель 6, тепловой поток от которого передается через, внутреннюю трубу, слой материала и наружную трубу в окружающую среду. При установившемся (стационарном) режиме через каждый слой проходит одно и то же количество теплоты, которое определяют по показаниям ваттметра. Потребляемая мощность регулируется регулятором напряжения 1. Благодаря хорошему контакту сыпучего материала с трубами, можно считать, что соприкасающиеся поверхности материала и труб имеют одинаковую температуру, которая измеряется с помощью хромель-алюмелевых термопар 5, зачеканенных в поверхности труб. Электродвижущую силу (ЭДС) в термопарах измеряют милливольтметром, подключая к нему термопары поочередно с помощью переключателя.

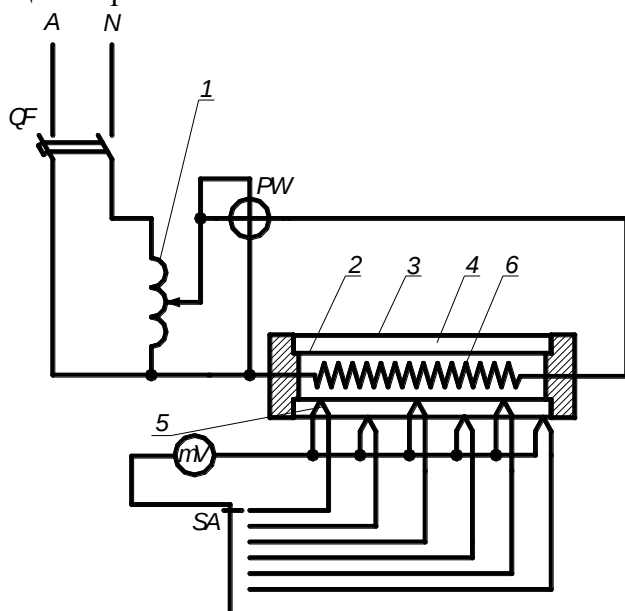


Рисунок 2 – Установка для определения коэффициента теплопроводности

6 ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

6.1 Выписать в бланк отчета по лабораторной работе цель работы, задание, краткую методику проведения эксперимента. Подготовить таблицу для записи показаний приборов (таблица 2).

6.2 По показанию ваттметра записать мощность электронагревателя, соответствующую первому стационарному режиму (установка включается преподавателем до начала занятий).

6.3 Переключателем включать поочередно все термопары и фиксировать для каждой из них значение ЭДС по милливольтметру с записью их значений в таблице. Замеры производить с интервалами в 3-5 минут до тех пор, пока величина ЭДС для каждой термопары не будет изменяться во времени, что свидетельствует о наступлении стационарного режима.

6.4 На стационарном режиме сделать три замера ЭДС по прибору для каждой термопары с интервалами в 5 минут и записать в соответствующие графы таблицы.

6.5 Измерить термометром температуру окружающего воздуха вблизи от установки.

6.6 Показать результаты замеров преподавателю и с его разрешения переключить установку 2-й режим, увеличив с помощью регулятора напряжения 1 мощность нагревателя на 20-47 Вт. Эксперимент проводить через 25-30 минут в той же последовательности.

7 ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

7.1 По градировочной таблице термопар определить ЭДС, соответствующую температуре окружающего воздуха, чтобы сделать поправку на температуру холодных спаев термопар находящихся при температуре окружающего воздуха. Градировочная таблица рассчитана на температуру холодных спаев, равную 0°C.

7.2 Определить суммарные ЭДС E_1 , E_2 ит.д. складывая в таблице для каждой термопары ЭДС по прибору с ЭДС, соответствующей температуре окружающего воздуха.

7.3 По градировочной таблице найти температуры в местах за чеканки термопар по значениям суммарных ЭДС.

7.4 Вычислить средние температуры поверхностей исследуемого слоя.

7.4.1 Средняя, температура внутренней поверхности слоя

$$t_{c1} = \frac{t'_1 + t'_2 + t'_3}{3}, ^\circ\text{C}.$$

7.4.2 Средняя температура наружной поверхности слоя

$$t_{c2} = \frac{t''_1 + t''_2 + t''_3}{3}, ^\circ\text{C}.$$

7.5 Определить среднюю температуру исследуемого слоя

$$t_c = \frac{t_1 + t_2}{2}, ^\circ\text{C}.$$

7.6 Вычислить коэффициент теплопроводности λ по формуле (3), принимая

$$Q = N \text{ Вт}; d_1 = 0,025 \text{ м}; d_2 = 0,05 \text{ м}; l = 1 \text{ м}$$

7.7 Полученные значения λ и t_c записать в таблицу.

7.8 Построить график зависимости $\lambda = f(t_c)$. По горизонтали отложить в выбранном масштабе средние температуры слоя (t_c , $^\circ\text{C}$), по вертикали соответствующие им значения коэффициентов теплопроводности.

7.9 Определить аналитическую зависимость коэффициента теплопроводности от температуры, которая для изоляционных и пористых материалов подчиняется линейному закону, и описываются уравнением

$$\lambda = \lambda_0(1 + bt) \quad (3)$$

где λ_0 – коэффициент теплопроводности при 0°C ;

b – постоянная, определяемая экспериментальным путем.

Величину λ_0 определить по графику после чего из уравнения (3) определить значение постоянной b , взяв из эксперимента значение t_c и соответствующее ему значение λ .

7.10 Полученные значения коэффициентов теплопроводности сравнить с табличными данными.

Таблица 2 –Исследование коэффициент теплопроводности

Определения величины			Обоз- начения	Ед. изм.	Режимы									
					1			2			3			
					Замеры									
Мощность электронагревателя			N	Вт										
Температура окружающего воздуха			t_{θ}	°C										
ЭДС, соответствующая температура окружающего воздуха			E_{θ}	мВ										
Внутренняя труба	Термопары	ЭДС по прибору	E'_{n1}	мВ										
		Суммарная ЭДС ($E'_{n1}+E_{\theta}$)	E'_1	мВ										
		Температура по- верхн. трубы (опр. по вел. E'_1)	t'_1	°C										
		ЭДС по прибору	E'_{n2}	мВ										
		Суммарная ЭДС ($E'_{n2}+E_{\theta}$)	E'_2	мВ										
		Температура по- верхн. трубы (опр. по вел. E'_2)	t'_2	°C										
		ЭДС по прибору	E'_{n3}	мВ										

Наружная труба	Термопары	Суммарная ЭДС ($E'_{n3}+E_{\epsilon}$)	E'_3	мВ														
		Температура по- верхн. трубы (опр. по вел. E'_3)	t'_3	°C														
	Термопары	ЭДС по прибору	E''_{n1}	мВ														
		Суммарная ЭДС ($E''_{n1}+E_{\epsilon}$)	E''_1	мВ														
		Температура по- верхн. трубы (опр. по вел. E''_1)	t''_1	°C														
		ЭДС по прибору	E''_{n2}	мВ														
		Суммарная ЭДС ($E''_{n2}+E_{\epsilon}$)	E''_2	мВ														
		Температура по- верхн. трубы (опр. по вел. E''_2)	t''_2	°C														
		ЭДС по прибору	E''_{n3}	мВ														
		Суммарная ЭДС ($E''_{n3}+E_{\epsilon}$)	E''_3	мВ														
		Температура по- верхн. трубы (опр. по вел. E''_3)	t''_3	°C														
Коэффициент теплопровод- ности исследуемого материа- ла			λ	$\frac{\hat{A}\delta}{\hat{i} \cdot \hat{E}}$														
Средняя температура исследуемого слоя			t_{cp}	°C														

ОТЧЕТ ПО РАБОТЕ

Отчет по выполненной работе должен содержать:

1 Цель работы.

2 Описание методики определения коэффициента теплопроводности.

3 Рисунок 2 и таблицу 2.

4 Результаты обработки экспериментальных данных.

5 График $\lambda = f(t_c)$.

6 Сопоставление результатов эксперимента с литературными данными.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каков физический смысл коэффициента теплопроводности? Выведите его размерность из закона Фурье.

2. Сформулируйте основной закон теплопроводности Фурье и приведите, его математическое выражение.

3. Что такое температурное поле, изотермические поверхности, температурный градиент?

4. Дайте графическую интерпретацию температурного градиента и теплового потока

5. Объясните, почему в формуле закона Фурье в дифференциальной форме в правой части имеется знак минус?

6. Что такое установившийся и неуставившийся тепловые режимы? Приведите математическое выражение в общем виде температурного поля для обоих случаев.

7. Почему пористые материалы имеют низкий коэффициент теплопроводности?

8. Как зависит коэффициент теплопроводности изоляционного материала от температуры?

9. Опишите схему приборов и принцип определения коэффициента теплопроводности по методу трубы.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3

«ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА ПРИ СВОБОДНОМ ДВИЖЕНИИ ВОЗДУХА»

1 ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Экспериментальное определение коэффициента теплоотдачи при свободном движении воздуха около горизонтальной трубы.

2 ЗАДАНИЕ

2.1 С помощью экспериментальной установки определить коэффициент теплоотдачи для горизонтальной трубы при свободном движении воздуха для двух стационарных режимов.

2.2 Построить график зависимости коэффициента теплоотдачи от температурного напора $\alpha = f(\Delta t)$.

2.3 Определить численное значение критериев подобия для различных тепловых режимов.

2.4 Сопоставить найденное экспериментальное значение коэффициента теплоотдачи α_0 со значением α_T определенным на основе критериального уравнения для свободного движения жидкости около горизонтальной трубы.

2.5 Составить отчет по выполненной работе.

3 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Теплоотдача при свободном движении теплоносителя имеет место в паровых котлах, в различных тепловых устройствах, при нагревании воздуха помещений отопительными приборами и т.д.

Свободным называется движение теплоносителя, обусловленное разностью плотностей нагретых и холодных его частиц. Тепловой поток, переданный от поверхности нагрето-

го тела жидкости, определяется на основании формулы Ньютона-Рихмана

$$Q = \alpha \cdot F \cdot \Delta t, \text{ Вт} \quad (1)$$

где F – теплоотдающая поверхность, м^2 ;

Δt – температурный напор (разность между средней температурой теплоотдающей поверхности и средней температурой жидкости), $^{\circ}\text{C}$;

α – коэффициент пропорциональности, характеризующий тепловой поток, переданный от единицы теплоотдающей поверхности к жидкости при температурном напоре, равном единице, носит название коэффициента теплоотдачи, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$.

Процесс теплоотдачи — сложный процесс, а коэффициент теплоотдачи — сложная Функция различна величин, характеризующих этот процесс. В общем случае коэффициент теплоотдачи является функцией скорости жидкости (воздуха), температуры жидкости, формы, физических- свойств жидкости, температуры поверхности, размеров l_1, l_2 тела и т.д.

$$\alpha = f(t_c, t_b, W) \quad (2)$$

Найти функцию аналитическим путем не представляется возможным. Для получения необходимых зависимостей, выражающих теплоотдачу, можно использовать теорию подобия. Эта теория позволяет вместо размерного уравнения представить выражение для коэффициента теплоотдачи в форме зависимостей, состоящих и размерных комплексов (критериев подобия). При этом все уравнения, входящие в математическое описание процесса конвективного теплообмена (теплоотдачи), приводятся к безразмерному, виду, появляются критерии подобия - безразмерные комплексы состоящие из нескольких физических величин. Эти комплекс выступают в качестве новых переменных вместо прежних размерных величин. При введении в уравнения безразмерных комплексов, число величин под знаком функции формально сокращается и упрощает исследование физических процессов. Кроме того, новые пере-

менные отражают влияние не только одиночных факторов, но и их совокупности, что позволяет легче определить физические связи в исследуемом процессе. Количественная связь между критериями подобия, может быть установлена только экспериментальным путем.

В настоящее время экспериментальное определение коэффициента теплоотдачи производится не на самих образцах тепловых устройств (таких громоздких как, например, паровой котел), а на их упрощенных и более удобных для экспериментирования моделях. Результаты экспериментов, проведенных на моделях обобщают с помощью тепловой теории подобия.

Таким образом, теория подобия определяет условия, которые должны быть удовлетворены, чтобы параметры работы моделей можно было перенести на агрегат.

Критериальные уравнения являются основной формой обработки полученных экспериментальных данных при исследовании единичного явления. После проведения экспериментов и обработки результатов критериальное уравнение является основным расчетным уравнением для всей группы подобных явлений.

Математическое описание применительно к свободному движению жидкости приводит к системе критериев подобия

$$Nu = C(Gr \cdot Pr)^n \quad (3)$$

В это уравнение входят следующие критерии подобия:

а) критерий Нуссельта, критерий теплоотдачи, характеризующий теплообмен на границе «стенка-жидкость»

$$Nu = \frac{\alpha \cdot d}{\lambda} \quad (4)$$

В задачах конвективного теплообмена критерий Nu является, искомой величиной, поскольку в него входит определяемая величина α ;

б) критерий Грасгофа характеризует подъемную силу, возникающую в жидкости вследствие разности плотностей

$$Gr = \frac{\beta \cdot g \cdot d^3 \cdot \Delta T}{\nu^2} \quad (5)$$

в) критерий Прандтля - критерий физических свойств жидкости

$$Pr = \frac{\nu}{a} \quad (6)$$

В приведенные безразмерные комплексы входят следующие величины:

а) физические свойства жидкости:

λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);

ν – коэффициент кинематической вязкости, м²/с;

ρ – плотность, кг/м³;

a – коэффициент температуропроводности. Характеризует скорость изменения температуры в теле, м²/с;

β – температурный коэффициент объемного расширения, характеризующий относительное изменение объема при изменении температуры на один градус, 1/К.

Для газов температурный коэффициент объемного расширения определяется по формуле

$$\beta = \frac{1}{T_g} \quad (7)$$

б) d – определяющий размер, м;

g – ускорение свободного движения, м/с².

В результате обобщения экспериментальных данных по теплоотдаче горизонтальной трубы при свободном движении воздуха получено следующее критериальное уравнение

$$Nu = 0,5(Gr \cdot Pr)^{0,25}. \quad (8)$$

В этой формуле за определяющую температуру, по которой выбираются физические свойства воздуха λ , ν , Pr , принята температура воздуха вдали от трубы, а за определяющий размер – диаметр, трубы.

4 МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛООТДАЧИ

Коэффициент теплоотдачи, характеризующий интенсивность теплоотдачи, может быть определен экспериментально из следующего соотношения, получающегося из формулы (1)

$$\alpha = \frac{Q_k}{F(T_c - T_b)}, \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}. \quad (9)$$

Для определения коэффициента теплоотдачи необходимо измерить в эксперименте значения температур поверхности и воздуха (T_c и T_b), количество теплоты, переданное путем конвекции от поверхности трубы воздуху.

5 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

В горизонтальной латунной трубе 2 (рисунок 3) установлен электрический нагреватель 3, в цепь которого включен ваттметр и регулятор напряжения 1. Температура поверхности трубы измеряется с помощью термопар, подключенных через многоточечный переключатель 4 к милливольтметру. Экспериментальная установка размещена в помещении, размеры которого значительно больше габаритов трубы, что позволяет считать теплообмен протекающим в неограниченном пространстве.

6 ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

6.1 В бланк отчета по лабораторной работе выписать из методических указаний цель работы, задание, краткую методику проведения эксперимента.

6.2 Заготовить таблицу записи показаний приборов по форме таблицы 3.

6.3 Ознакомиться с экспериментальной установкой и, после беседы с преподавателем, приступить к выполнению пер-

вого стационарного режима (установка включена до начала занятий).

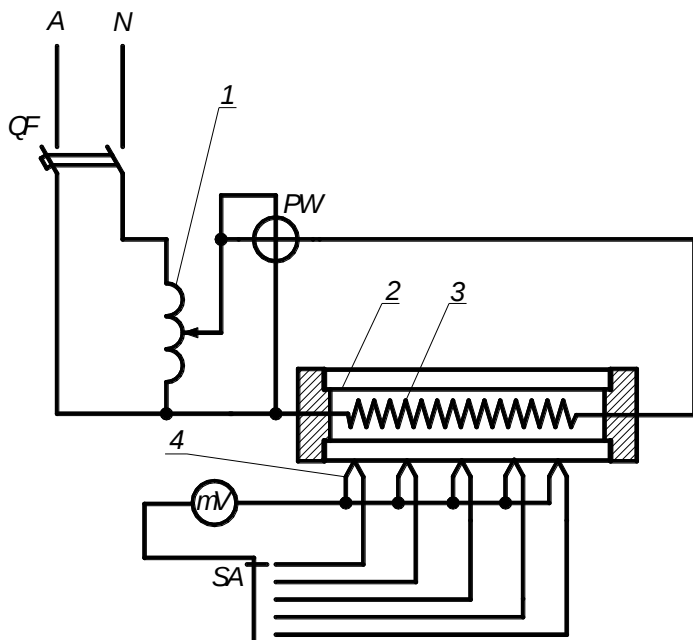


Рисунок 3 – Установка для определения коэффициента теплоотдачи воздуха

6.4 С помощью переключателя включать поочередно все термопары и фиксировать для каждой из них значения ЭДС по милливольтметру с записью значений в таблицу. Замеры производить с интервалами в 3-5 минут до тех пор, пока величина ЭДС для каждой пары не будет изменяться во времени, что свидетельствует о наступлении стационарного режима.

6.5 На стационарном режиме сделать 3 замера с интервалами в 3 мин. и записать в соответствующие графы таблицы 3 значения следующих величин:

- а) ЭДС по прибору для каждой термопары (показания милливольтметра);
- б) мощности электронагревателя (показания ваттметра);

в) температуры окружающего воздуха (измеряются термометром вблизи от установки и вдали от нее).

6.6. Реостатом увеличивать мощность, потребляемую нагревателем, и при установившемся тепловом режиме проводить необходимые измерения. Интервал между режимами 15-20 минут.

7 ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

7.1 С помощью градуировочной таблицы термопар определить ЭДС соответствующую температуре окружающего воздуха, при которой находятся холодные спаи термопар (находится величина поправки на температуру холодных спаев термопары t_c)

7.2 Величину этой поправки просуммировать с ЭДС, измеренной милливольтметром.

7.3 С помощью градуировочной таблицы по суммарной ЭДС определить температуры поверхности трубы в местах зачеканки термопар.

7.4 Для каждого установившегося теплового режима вычислить среднее значение температур, поверхности трубы

$$t_c = \frac{t_{c1} + t_{c2} + t_{c3} + t_{c4} + t_{c5}}{5} \quad (10)$$

где t_{c1}, t_{c2}, t_{c3} и т.д. – температуры в местах зачеканки термопар.

7.5 Определить температурный напор ΔT - разность между средней температурой трубы и воздуха вдали от установки

$$\Delta T = T_c - T_g \quad (11)$$

7.6 Вычислить количество теплоты, переданной конвекцией от трубы окружающей среде

$$Q_k = Q_{полн} - Q_{луч} \quad (12)$$

где $Q_{полн}$ – полное количество теплоты, выделенное электронагревателем и переданное в окружающую среду путем конвекции и излучения, численно равное мощности нагревателя, Вт;

$Q_{луч}$ – количество теплоты, переданное нагретой трубой в окружающую среду, Вт.

$$Q_{луч} = \varepsilon \cdot c_0 \cdot F \left[\left(\frac{T_c}{100} \right)^4 + \left(\frac{T_e}{100} \right)^4 \right], \text{ Вт}, \quad (13)$$

где ε – степень черноты поверхности трубы, $\varepsilon = 0,28$;

$c_0 = 5,67$ – коэффициент излучения черного тела, Вт/(м²·К);

T_c, T_e – абсолютные температуры поверхности и воздуха, К.

7.7. Рассчитать для каждого теплового режима коэффициент теплоотдачи по формуле (9). Площадь поверхности трубы:

$l = 1,2$ м – длина трубы;

$d = 0,03$ м – диаметр трубы;

7.8 Построить график зависимости.

7.9 Вычислить для каждого из двух режимов значения критериев Грасгофа и Прандтля по формуле (5, 6) на основании найденных из эксперимента величин. Физические параметры воздуха (λ, ν, Pr) выбирать из таблиц физических свойств сухого воздуха по температуре воздуха вдали от установки.

7.10 Найти для каждого из двух режимов значения критерия Нуссельта из критериального уравнения (8), а затем по критерию Нуссельта значение среднего коэффициента теплоотдачи при свободном движении воздуха около горизонтальной трубы.

7.11 Сопоставить полученные значения коэффициентов теплоотдачи со значениями этих коэффициентов, определенных из эксперимента для двух режимов.

7.12 Определить температуру пограничного слоя

$$t_r = \frac{t_{\theta} + t_{cmcp}}{2}$$

7.13 Определить среднюю температуру воздуха вдали от установки

$$t''_{\theta cp} = \frac{t'_{\theta} + t''_{\theta}}{2}$$

Таблица 3 – Экспериментальные данные

Определяемые величины		Обозначения	Ед. изм.	Режимы									
				1			2			3			
				Замеры									
Температура окр. возд. начальная		t_{θ}	°С										
ЭДС темп. окружающего воздуха		E_{θ}	мВ										
Термопары	ЭДС по прибору	E_{n1}	мВ										
	Суммарная ЭДС ($E_{n1}+E_{\theta}$)	E_1	мВ										
	Температура по- верхн. трубы (опр. по вел. E_1)	t_{cm1}	°С										
	ЭДС по прибору	E_{n2}	мВ										
	Суммарная ЭДС ($E_{n2}+E_{\theta}$)	E_2	мВ										
	Температура по- верхн. трубы (опр.	t_{cm2}	°С										

те- рии	Прандтля	Pr																	
	Нуссельта	Nu																	

ОТЧЕТ ПО РАБОТЕ

Отчет по выполненной работе, должен содержать:

1. Цель работы.
2. Задание.
3. Методику экспериментального определения коэффициента теплоотдачи при свободном движении воздуха около горизонтальной трубы.
4. Рисунок 3 и таблицу3.
5. Результаты обработки экспериментальных данных.
6. График зависимости коэффициента теплоотдачи от температурного напора.
7. Сопоставление результатов эксперимента с теоретическими данными.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 1 Что такое конвективный теплообмен?
- 2 Что такое естественная конвекция?
- 3 Что такое коэффициент теплоотдачи? Выведите его размерность из уравнения Ньютона-Рихмана. От каких факторов зависит коэффициент теплоотдачи?
- 4 Каково значение теории подобия в экспериментальных исследованиях конвективного теплообмена?
- 5 Приведите основные критерии подобия, характеризующие явление конвективного теплообмена.
- 6 Приведите критериальные зависимости в общем виде для конвективного, теплообмена при свободном и вынужденном движении жидкости.
- 7 Как определяется экспериментальным путем коэффициент теплоотдачи при свободном движении у нагретой круглой трубы?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4. «ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТЕПЕНИ ЧЕРНОТЫ МАТЕРИАЛА»

1 ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Определение степени черноты материала методом двух эталонов.

2 ЗАДАНИЕ

2.1 Ознакомиться с методикой экспериментального определения степени черноты материала.

2.2 С помощью экспериментальной установки определить степень черноты исследуемого образца материала.

2.3 Вычислить основные характеристики лучистого теплообмена для поверхности образца

2.4 Составить отчет по выполненной работе

3 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Процессы лучистого теплообмена играют важную роль в современной теплоэнергетике (топках паровых котлов, двигателях внутреннего сгорания), светотехнике, сушильной технике и во многих других отраслях техники и народного хозяйства.

Носителями энергии при теплообмене излучением являются электромагнитные волны различной частоты (или фотоны), испускаемые нагретым телом или средой. С увеличением температуры вещества, количество испускаемой им электромагнитной энергии резко увеличивается, поэтому при высоких температурах теплообмен излучением становится доминирующим по сравнению с другими видами теплообмена – теплопроводностью и конвекцией.

Излучение тел обусловлено сложными, внутриатомными процессами, в результате которых другие виды энергии превращаются в энергию электромагнитного излучения (лучистую энергию).

Лучистой энергией называют энергию колебаний непрерывного электромагнитного поля. Свойства лучистой энергии существенно зависят от длины волны этих колебаний. В интервале $0,4 < \lambda < 800$ мкм лучистая энергия обладает свойствами теплового излучения. К этим свойствам, прежде всего следует отнести способность теплового излучения к испусканию, распространению, поглощению, отражению и пропусканию.

Лучеиспусканием называют процесс превращения внутренней энергии тела в лучистую энергию. Лучеиспускание присуще всем телам и зависит от их температуры и физических свойств. В непрозрачных твердых телах лучистая энергия генерируется в весьма тонких слоях около поверхности тела. Поэтому изучают лучеиспускание поверхности тела, не рассматривая процессы образования лучистой энергии в его массе.

Переносом лучистой энергии называют процесс ее распространения. Характер этого процесса определяется физическими свойствами среды, в которой происходит перенос излучения, а также спектральным составом излучения.

Поглощением называют процесс превращения во внутреннюю энергию части лучистой энергии, попавшей, на тело. Поглощение, как и излучение, присуще всякой вещественной среде.

Попавшая на тело лучистая энергия частично поглощается, частично отражается от него, а частично проходит сквозь тело без превращения в другие виды энергии. Совокупность процессов испускания, переноса, поглощения, отражения и пропускания теплового излучения в системах различных тел называют, лучистым теплообменом.

Лучистый теплообмен может протекать и при отсутствии вещественной среды между телами. Он может протекать и

между телами с одинаковой температурой, однако результирующий перенос теплоты от тела к телу в этом случае будет отсутствовать (в силу второго закона термодинамики). Такой процесс лучистого теплообмена тел называют, равновесным.

В расчетах лучистого теплообмена тел находят применение следующие, простейшие понятия:

а) Интегральный лучистый поток Q , Вт - количество энергии излучаемой во всем диапазоне спектра ($0 < \lambda < \infty$), и проходящей через поверхность F .

б) Интегральная плотность полусферического излучения E - интегральный поток лучистой энергии, проходящей через единицу поверхности во всех направлениях полусферического, телесного угла,

$$E = \frac{dQ}{dF}, \quad \text{Вт/м}^2 \quad (1)$$

Использование первого и второго начал термодинамики для равновесного излучения приводит к фундаментальным законам Стефана-Больцмана и Кирхгофа.

Уравнение закона Стефана-Кирхгофа для полусферической плотности интегрального собственного излучения серого тела записывается так

$$E_{\text{соб}} A C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4, \quad \text{Вт/м}^2 \quad (2)$$

где $E_{\text{соб}}$ – плотность собственного излучения, которое возникает в массе тела, проходит через его поверхность и определяется физической природой и температурой тела;

A – коэффициент поглощения тела, характеризует способность тела поглощать лучистую энергию;

T – абсолютная температура тела, К;

C_0 - коэффициент пропорциональности, коэффициент излучения черного тела. $C_0 = 5,67 \text{ Вт/(м.кв.} \cdot \text{K}^4)$.

Средней степенью черноты тела ε называют отношение плотности собственного излучения $E_{\text{соб}}$ реального тела к

плотности собственного излучения $E_{\text{соб.о}}$ черного тела при той же температуре.

$$\varepsilon = \frac{E_{\text{соб}}}{E_{\text{соб.о}}} \quad (3)$$

В условиях равновесного лучистого теплообмена степень черноты ε численно равна его коэффициенту поглощения A .

В инженерных расчетах теплопередачи излучением пользуются понятием серой тела, которое является абстракцией, как и понятие черного тела.

Серым называют непрозрачное тело, которое в одинаковой степени поглощает падающие лучи всех длин волн при любых температурах.

Во многих практических случаях поверхности тел, с которыми приходится иметь дело, покрыты пленкой окислов металлов, пылью и имеют значительную шероховатость. Спектр излучения таких поверхностей близок к спектру излучения серого тела.

Тела, которые поглощают всю падающую на них энергию называют абсолютно черными ($A=1$). Для серого тела коэффициент поглощения $A < 1$ и не зависит от спектрального состава падающего излучения.

$$E_{\text{погл}} + E_{\text{отрж}} = E_{\text{пад}} \quad (4)$$

Поделив последнее соотношение на величину $E_{\text{пад}}$, получим

$$A + R = 1 \quad (5)$$

где $A = \frac{E_{\text{погл}}}{E_{\text{пад}}}$, $R = \frac{E_{\text{отрж}}}{E_{\text{пад}}}$ — коэффициенты поглощения и отражения тела.

Суммарная величина плотностей потоков собственного отраженного излучения, испускаемого поверхностью данного тела указывается плотностью эффективного излучения

$$E_{эф} = E_{соб} + E_{отрж} \quad (6)$$

Эффективное излучение зависит не только от физических свойств и температуры данного тела, но и от физических свойств и температуры окружающих его тел, а также от формы, размеров и относительного расположения тел в пространстве. Лучистый теплообмен между телами определяется потоком результирующего излучения равным разности между приходом и расходом лучистой энергии либо на внешней, либо на внутренней поверхности тела.

Для непрозрачного тела на внутренней стороне ($n = -0$) его поверхности имеем

$$E_{рез} = E_{пол} - E_{соб} \quad (7)$$

а на внешней стороне ($n = +0$)

$$E_{рез} = E_{над} - E_{эф} \quad (8)$$

Результирующий поток, переданный от поверхности тела в окружающую среду, может быть определен по формуле

$$Q = \varepsilon C_0 F \left[\left(\frac{T_c}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_b}{100} \right)^4 \right], \text{ Вт} \quad (9)$$

где ε - степень черноты тела;

T_c - абсолютная температура поверхности тела;

T_b - абсолютная температура окружающего воздуха.

4 МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТЕПЕНИ ЧЕРНОТЫ МАТЕРИАЛА

Для определения степени черноты материала предлагается метод двух эталонов (рисунок 4).

Три цилиндра 3 одного и того же диаметра отличаются друг от друга только характером поверхности, т.е. имеют различную степень черноты

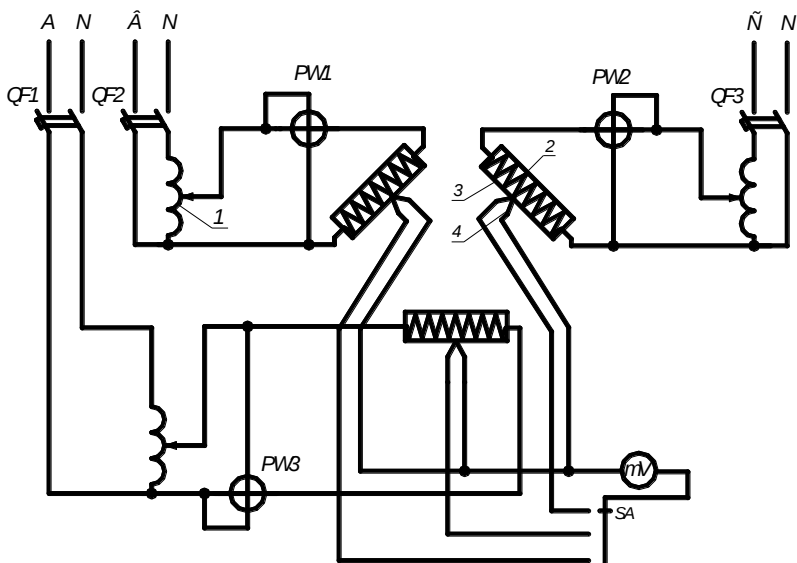


Рисунок 4 – Установка для определения степени черноты материалов

Подразумевается, что и близкие соответственно единице и нулю - величины известные, степень черноты образца подлежит определениям. Если все тела поместить в одинаковые условия и с помощью электрических нагревателей 2 установить на поверхности каждой одинаковую температуру (T_{θ}) измерение которой производится хромель-алюмелевыми термopарами 4, то формулы стационарного теплообмена будут выражены соответственно уравнениями

$$Q_u = \varepsilon_u C_0 F \left[\left(\frac{T_n}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\theta}}{100} \right)^4 \right] + \lambda F (T_n - T_{\theta}) + Q_T, \quad (10)$$

$$Q_0 = \varepsilon_0 C_0 F \left[\left(\frac{T_n}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\theta}}{100} \right)^4 \right] + \lambda F (T_n - T_{\theta}) + Q_T, \quad (11)$$

$$Q_b = \varepsilon_b C_0 F \left[\left(\frac{T_n}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\theta}}{100} \right)^4 \right] + \lambda F (T_n - T_{\theta}) + Q_T, \quad (12)$$

где T_{ε} - температура окружающего воздуха, К;

λ - коэффициент теплоотдачи, Вт/(м·К);

F - площадь поверхности цилиндра, м²;

T_n - абсолютная температура поверхности цилиндра, К;

Q_T - отдача теплоты с торцов цилиндров, Вт;

Решая совместно уравнения, получим

$$Q_{\varepsilon} - Q_o = C_0 F \left[\left(\frac{T_n}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\varepsilon}}{100} \right)^4 \right] (\varepsilon_{\varepsilon} - \varepsilon_o), \quad (13)$$

$$Q_o - Q_B = C_0 F \left[\left(\frac{T_n}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\varepsilon}}{100} \right)^4 \right] (\varepsilon_o - \varepsilon_B). \quad (14)$$

Разделим (13) на (14)

$$\frac{Q_{\varepsilon} - Q_o}{Q_o - Q_B} = \frac{\varepsilon_{\varepsilon} - \varepsilon_o}{\varepsilon_o - \varepsilon_B} = \frac{W_{\varepsilon} - W_o}{W_o - W_B}, \quad (15)$$

где W_{ε} , W_B , W_o - мощности соответствующих нагревателей, Вт.

Степень черноты образца

$$\varepsilon_o = \frac{\varepsilon_{\varepsilon} - \varepsilon_B B}{1 + B}, \quad (16)$$

где B - комплекс, выраженный через измеренные мощности нагревателей.

$$B = \frac{W_{\varepsilon} - W_o}{W_o - W_B} \quad (17)$$

Преимущество данного метода определения степени черноты тела по сравнению с другими известными методами заключается в следующем:

а) не требуется определение температур с высокой степенью точности, так как они входят в расчетные соотношения в четвертых степенях;

б) отпадает необходимость каких-либо мероприятий уменьшения конвективного теплообмена, которые обычно сильно усложняют обстановку.

5 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Лабораторная работа установка выполнена из трех одинаковых цилиндров (рисунок 4).

Одна трубка покрывается краской из сажи на основе с жидким стеклом. ($\varepsilon_q = 0,95$), вторая - слоем серебра ($\varepsilon_B = 0,03$), а третья является исследуемым образцом, степень черноты поверхности (ε_o) которой надо определить.

Трубки установки сделаны одинаковой длины и одинаковым способом изолированы с торцов. Поэтому можно полагать, что распределение температур на них будет одинаковым.

Измерение температур производится термопарами в средней части трубок.

6 ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

6.1 Выписать из методических указаний в бланк отчета цель работы, задание, краткую методику экспериментального определения степени черноты. Заготовить таблицу записи показаний приборов.

6.2 Приступить к исследованию на первом стационарном режиме. Электронагреватели всех трех трубок включены до начала занятий, с помощью регуляторов напряжения установлены предварительно мощности нагревателей по ваттметрам, исходя из условий.

6.3 С помощью регуляторов напряжения добиться такого, состояния системы, когда ЭДС термопар соответствующие температурам поверхностей «черного» тела, образца и «белого» тела будут одинаковы и не изменятся с течением времени.

6.4 С помощью милливольтметра сделать три замера ЭДС для каждой термопары с интервалом в пять минут с записью значений в таблицу 4.

6.5 С помощью термометра измерить температуру окружающего воздуха вблизи от установки.

6.6 Записать показания ваттметров, включенных в цепь трех нагревателей.

6.7 Увеличить мощность электронагревателей, сохраняя условия $W_{\text{ч}} > W_{\text{о}} > W_{\text{б}}$ и через 10-15 минут приступить к исследованию на втором стационарном режиме.

Таблица 4 – Показания приборов для стационарного режима

№ замеров	«Белое тело»				«Серое тело»			«Черное тело»		
	Мощность нагревателя $W_{\text{б}}$, Вт				Мощность нагревателя $W_{\text{о}}$, Вт			Мощность нагревателя $W_{\text{ч}}$, Вт		
	ЭДС по прибору $E_{\text{пб}}$, мВ	ЭДС по температуре $E_{\text{еб}}$, мВ	ЭДС суммарная $E_{\text{пб}} + E_{\text{еб}}$, мВ	температура поверхности стенки, $t_{\text{б}}$, °C	ЭДС по прибору $E_{\text{по}}$, мВ	суммарная ЭДС $E_{\text{по}} + E_{\text{еб}}$, мВ	температура поверхности стенки, $t_{\text{о}}$, °C	ЭДС по прибору $E_{\text{пч}}$, мВ	суммарная ЭДС $E_{\text{пч}} + E_{\text{еб}}$, мВ	температура поверхности стенки, $t_{\text{ч}}$, °C

7 ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

7.1 С помощью градуировочной таблицы термопар определить ЭДС, соответствующую температуре окружающего воздуха, при которой находятся холодные спаи термопар (величина поправки $E_{\text{е}}$).

7.2 Просуммировать величину поправки $E_{\text{е}}$ и $E_{\text{н}}$ - ЭДС, измеренную милливольтметром;

7.3 С помощью градуировочной таблицы по суммарной ЭДС определить температуры поверхностей трубок.

7.4 Рассчитать степень черноты образца по формуле 16.

7.5 Исходя из выражения (9), определить плотность результирующего излучения выходящего с поверхности образца $E_{рез}$,

$$E_{рез} = \frac{Q_{рез}}{F} = \varepsilon C_0 \left[\left(\frac{T_n}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_a}{100} \right)^4 \right] \quad \text{Вт} / \text{м}^2 \quad (18)$$

7.6 Сопоставить найденное значение степени черноты, материала с табличным значением.

ОТЧЕТ ПО РАБОТЕ

Отчет по выполненной работе должен содержать:

- 1 Цель, работы.
- 2 Методику экспериментального определения степени черноты материала.
- 3 Рисунок 4 и таблицу 4.
- 4 Результаты обработки экспериментальных данных.
- 5 Сопоставление результатов, эксперимента с литературными данными.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 1 Какова природа энергии излучения?
- 2 Что является источником теплового излучения?
- 3 Что представляет собой процесс лучистого теплообмена?
- 4 Какой теплообмен называется равновесным лучистым теплообменом?
- 5 Какие основные характеристики лучистого теплообмена?
- 6 Закон сохранения энергии для плотностей лучистых потоков.
- 7 Основные законы равновесного теплового излучения.
- 8 Что называется степенью черноты тела? Понятие серого тела.

9 В чем состоит сущность метода определения степени черноты материала методом двух эталонов?

10 Формула для расчета лучевого теплообмена в системе двух тел.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5

«ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОТДАЧИ ПРИ СВОБОДНОМ ДВИЖЕНИИ ВОЗДУХА У ВЕРТИКАЛЬНОЙ ТРУБЫ»

1 ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Экспериментальное исследование теплоотдачи при свободном движении воздуха у вертикальной трубы.

2 ЗАДАНИЕ

2.1 Определить с помощью экспериментальной установки локальный коэффициент теплоотдачи.

2.2 Построить график зависимости локального коэффициента теплоотдачи высоте трубы для стационарного режима.

2.3 Сопоставить найденное из эксперимента значение коэффициента теплоотдачи α_o для области, турбулентного режима со значением α_T определенным из критериального уравнения для данного режима.

2.4 Сопоставить отчет по выполненной работе.

3 ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Свободным называется движение воздуха вследствие разности плотностей нагретых и холодных его частиц. Теплоотдачи при свободном движении воздуха является одним из видов конвективного обмена и происходит при омывании воздухом нагретой стенки.

Тепловой поток, переданный от нагретой стенки воздуху, определяется по формуле Ньютона-Рихмана

$$Q = \alpha F (t_c - t_a), \text{ Вт}, \quad (1)$$

где F – теплоотдающая поверхность, м^2 ;

t_c, t_a – средние температуры стенки и воздуха, $^{\circ}\text{C}$;

α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м·К) – тепловой поток, переданный от единицы площади теплоотдающей поверхности к воздуху при температурном напоре, равном единице.

Коэффициент теплоотдачи является сложной функцией различных величин, характеризующих этот процесс. Он зависит от температур стенки и воздуха (t_c, t_a) скорости движения воздуха (W), физических свойств воздуха (λ, c_p, ρ, μ), формы тела (Φ); его размеров ($l_1, l_2 \dots$), т.е.

$$\alpha = f(l_1, l_2, \Phi, \dots, t_c, t_a, W, \lambda, \rho, \mu, c_p, \dots) \quad (2)$$

Найти функцию аналитически не представляется возможным. Для получения необходимых зависимостей, выражающих теплоотдачу, используют теорию подобия. Теория подобия – это учение о подобии явлений.

Она позволяет определить коэффициент теплоотдачи экспериментальным путем не на самих образцах (где это может быть затруднительно), а на их упрощенных и более удобных для экспериментирования моделях. На основании теории подобия величины, характеризующие явления, можно объединить в безразмерные комплексы, называемые критериями подобия, которые для подобных явлений будут одинаковы. Критерий подобия в уравнениях, описывающих процесс, выступают в качестве новых переменных вместо прежних размерных величин. Введение их в уравнение сокращает числа величин под знаком функции, что упрощает исследование физических процессов.

Критериальные уравнения являются основной формой обработки экспериментальных данных, полученных при исследовании единичного явления. Для процесса свободной конвекции критериальное уравнение, имеет вид

$$Nu = C(Gr Pr)^n \quad (3)$$

где Nu – критерий Нуссельта, характеризующий интенсивность процесса активного теплообмена,

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda} \quad (4)$$

Gr – критерий Грасгофа, характеризующий подъемную силу, вызывающую свободное движение среды,

$$Gr = \frac{g\beta\Delta t d^2}{\nu^2} \quad (5)$$

Pr – критерий Прандтля, являющийся теплофизической характеристикой среды

$$Pr = \frac{\nu}{a} \quad (6)$$

В приведенные критерии подобия входят следующие величины:

α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К);

l – определяющий размер, (м);

λ – коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м·К);

g – ускорение свободного падения ($g=9,81$ м/с²);

β – коэффициент объемного расширения воздуха,

$$\beta = \frac{1}{T_b}, 1/K \quad (7)$$

Δt – разность температур между поверхностью стенки и воздухом ($\Delta t = t_c - t_g$)

ν – коэффициент кинематической вязкости воздуха,;

a – коэффициент температуропроводности, м²/с.

Критерий Грасгофа Gr и Прандтля Pr в уравнении (3) является определяющими, а критерий Нуссельта Nu – определяемым, так как содержит, неизвестный коэффициент теплоотдачи.

В результате обобщения экспериментальных данных по теплоотдаче при свободном движении теплоносителя вдоль вертикальной трубы получены следующие критериальные уравнения:

а) при $10^3 < Gr \cdot Pr < 10^9$ (ламинарный режим)

$$Nu = 0,75(Gr Pr)^{0,25}$$

б) при $Gr Pr > 10^9$ (турбулентный режим)

$$Nu = 0,15(Gr Pr)^{0,33}$$

В этих формулах за определяющую температуру принята температура воздуха вдали от нагретой поверхности, за определяющий размер – длина поверхности, о считываемая от начала теплообмена.

После определения критерия Nu из уравнения (4) определяют коэффициент теплоотдачи.

На рисунке 5 показана характерная картина движения воздуха вдоль вертикальной трубы и изменение коэффициента теплоотдачи вдоль вертикальной стенки.

У нижней части стенки в поднимающемся с небольшой скоростью воздуха наблюдается ламинарное движение с постепенно увеличивающейся толщиной пограничного слоя δ/λ . Поэтому коэффициент теплоотдачи, считая от нижнего конца стенки, уменьшается. На некоторой высоте ламинарный пограничный слой начинает разрушаться, возникает переходной режим движение жидкости, которое постепенно усиливается и переходит в развитое турбулентное движение. Поэтому коэффициент теплоотдачи в области переходного режима движения возрастает и принимает наибольшее постоянное значение в области развитого турбулентного движения жидкости.

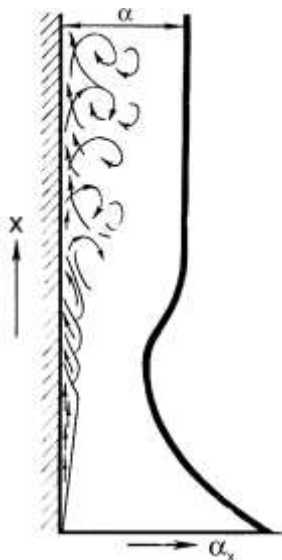


Рисунок 5 – Схематическое изображение
свободного движения воздуха

4 МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛООТДАЧИ

Среднее значение коэффициента теплоотдачи определяют по формуле

$$\alpha_{cp} = \frac{\sum_{\delta=1}^n \alpha_{i,лок}}{n} \quad (10)$$

где $\alpha_{i,лок}$ – локальное значение коэффициента теплоотдачи в местах зачеканки термопар;

n – число термопар.

Значение локального коэффициента теплоотдачи определяют из уравнения

$$\alpha_{i,лок} = \frac{Q_k}{F(T_{с,лок} - T_B)}, \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}, \quad (11)$$

где Q_k – конвективная составляющая полного теплового потока (мощность электронагревателя),

$$Q_k = Q_{полн} - Q_{луч} \quad (12)$$

$Q_{луч}$ – лучистая составляющая полного теплового потока,

$$Q_{луч} = \varepsilon c_0 F \left[\left(\frac{T_{с\,лок}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_в}{100} \right)^4 \right], \text{ Вт} \quad (13)$$

ε – степень черноты поверхности трубы, $\varepsilon = 0,22$;

c_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела,
 $c_0 = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$;

$T_{с\,лок}$ – локальная температура поверхности стенки в месте зачеканки термопары $T_{с\,лок} = t_{с\,лок} + 273 \text{ К}$;

$T_в$ – температура воздуха вдали от установки, $T_в = t_в + 273 \text{ К}$;

F – площадь поверхности трубы, м^2 .

5 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

В вертикальной латунной трубе 2 закреплен на изоляторах 3 электронагреватель 4, в цепь которого включены ваттметр и регулятор напряжения 1 (рисунок 6). Температура поверхности трубы измеряется с помощью хромель-алюмелевых термопар 5. Электродвижущую силу (ЭДС), возникающую в термопарах, измеряют милливольтметром, подключая к нему термопары поочередно с помощью переключателя.

Экспериментальная установка размещена в помещении, размеры которого значительно больше габаритов трубы, что позволяет считать, что теплообмен протекает в неограниченном пространстве.

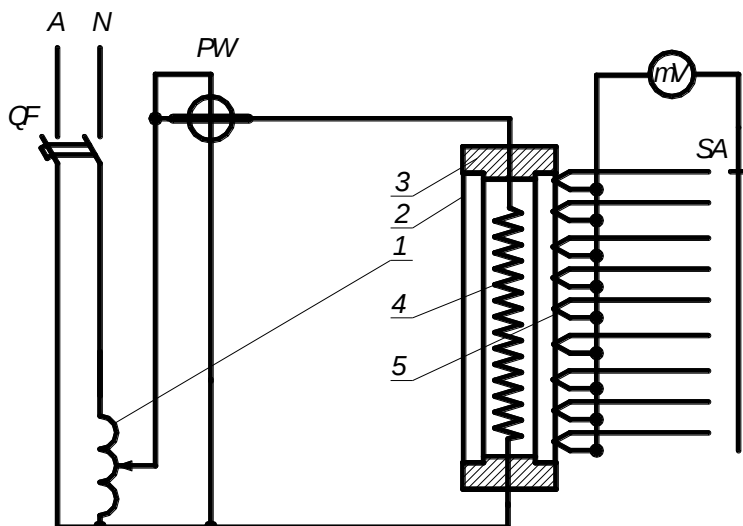


Рисунок 6 – Установка для исследования теплоотдачи при свободном движении воздуха у вертикальной трубы

6 ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

6.1 В бланке отчета по лабораторной работе выписать из методических указаний цель работы, задание, краткую методику проведения эксперимента.

6.2 Заготовить таблицу записи показаний приборов (таблица 5).

6.3 Переключателем включать поочередно все термопары и фиксировать для каждой из них значение ЭДС по милливольтметру с записью их в таблице 5. Замеры, производить с интервалами в 3-5 минут до тех пор, пока величина ЭДС для каждой термопары не будет изменяться во времени, что свидетельствует о наступлении стационарного режима.

6.4 На стационарном режиме сделать три замера с интервалами в 3 мин. и записать в соответствующие графы таблицы 5 значения следующих величин:

а) ЭДС по прибору E_n для каждой, термопары (показания милливольтметра);

б) полное количество теплоты $Q_{полн}$, выделенное электро-нагревателем (показания ваттметра), $Q_{полн} = N$;

в) температуры окружающего воздуха t'_ϵ и t''_ϵ (измеряют термометром соответственно вблизи от установки и вдали от нее).

Таблица 5 – Показания приборов и результаты измерений на стационарном режиме $Q = const$

№ термопар	ЭДС по прибору E_n , мВ				ЭДС по температуре воздуха E_ϵ , мВ	Суммарная ЭДС $E_n + E_\epsilon$, мВ	Температура стенки t_c , °C
1							
2							
3							
...							
15							

7 ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

7.1 По градуировочной таблице термопар определить ЭДС (E_ϵ), соответствующую температуре t_ϵ , с целью сделать поправку на температуру холодных спаев термопар, находящихся при температуре окружающего воздуха (градуировочная таблица составлена при температуре холодных спаев равной 0 °C).

7.2 Определить суммарные ЭДС E_1 , E_2 , и т.д., складывая в таблице 5 ЭДС по прибору с ЭДС, соответствующей температуре окружающего воздуха.

7.3 По значениям суммарных ЭДС с помощью градуировочной таблицы определить температуры в местах зачеканки термопар (t_1 , t_2 , t_3 и т.д.).

7.4 Определить локальные коэффициенты теплоотдачи (расчет вести в таблицу 6)

Таблица 6 –Определение локальных коэффициентов теплоотдачи

Термопары	Температуры поверхности трубы, $T_{с\text{ лок}}$, К	Количество теплоты переданное излучением, $Q_{луч}$, Вт	Количество теплоты, переданное конвекцией $Q_k = Q_{полн} - Q_{луч}$	Локальный коэффициент теплоотдачи $\alpha_{лок}$, Вт/(м ² ·К)
5				

7.5 Определить среднее значение теплоотдачи по уравнению (10).

7.6 В выбранном масштабе построить график изменения локальных коэффициентов теплоотдачи по высоте трубы, начиная от нижней термопары. Расстояние от нижнего конца трубы до -15-й термопары - 50 мм, между остальными термопарами 130 мм (термопары пронумерованы сверху вниз).

7.7 По значению температуры воздуха вдали от установки выписать из таблицы физических свойств воздуха физические параметры: коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м·К); коэффициент кинематической вязкости ν , м²/с; критерий: Прандтля Pr .

7.8 Определить критерий Gr по уравнению (5), при этом $\Delta t = t_c - t_g$, где t_c – постоянная температура поверхности стенки в области развитого турбулентного движения. В качестве определяющего размера принимается длина трубы от начала до конца турбулентного участка.

7.9 При значении $Gr \cdot Pr > 6 \cdot 10^{10}$ по уравнению (9) вычислить критерий Nu из уравнения (4) определить среднее значение коэффициента теплоотдачи, сопоставляя с полученным из эксперимента для области развитого турбулентного режима.

ОТЧЕТ ПО РАБОТЕ

Отчет по выполненной работе должен содержать:

- 1 Цель работы.
- 2 Задание.
- 3 Методику экспериментального исследования.
- 4 Рисунок 6, таблицу 5 записи показаний приборов и таблицу 6 результаты обработки экспериментальных данных.
- 5 Графики $t_{лок} = f(h)$; $\alpha_{лок} = f(h)$.
- 6 Сопоставление результатов эксперимента с литературными данными.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 1 Что такое конвективный теплообмен?
- 2 Что такое естественная конвекция?
- 3 Что такое коэффициент теплоотдачи. Выведите его размерность из уравнения Ньютона-Рихмана. От каких факторов зависит коэффициент теплоотдачи?

4 Каково значение теории подобия в экспериментальных исследованиях конвективного теплообмена?

5 Дайте определение критериев подобия.

6 Приведите основные критерии подобия, характеризующие явления конвективного теплообмена. Приведите критериальное уравнение в общем виде при свободном движении.

7 Как рассчитывается коэффициент теплоотдачи при свободном движении у нагретой круглой трубы?

8 Почему характер кривой $\alpha_{\text{лок}} = f(h)$ зеркально симметричен кривой $t_{\text{лок}} = f(h)$; ?

9 Каков характер движения воздуха у нижней части стенки вертикальной нагретой трубы? Как изменяется коэффициент теплоотдачи в этой области?

10 Как изменяется коэффициент теплоотдачи в переходной области с развитым турбулентным движением у стенки вертикальной нагретой трубы?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №6 «ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТЕПЛООТДАЧИ И ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ ОТОПИТЕЛЬНОГО ПРИБОРА»

1 ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Получение практических навыков в определении коэффициентов теплоотдачи и теплопередачи отопительного прибора.

2 ЗАДАНИЕ

2.1 Ознакомиться с методикой экспериментального определения коэффициентов теплоотдачи и теплопередачи отопительного прибора.

2.2 Для остановившегося режима передачи теплоты произвести необходимые замеры величин и обработку результатов эксперимента.

2.3 Составить отчет о выполненной работе.

3 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Процесс теплообмена от горячего теплоносителя – воды к холодному теплоносителю – воздуху помещения через стенку отопительного прибора представляет сложный процесс теплообмена, называемый теплопередачей. Этот сложный процесс состоит из трех этапов:

а) теплоотдача от горячего теплоносителя к внутренней поверхности стенки нагревательного прибора. Интенсивность этого процесса характеризуется коэффициентом теплоотдачи;

б) перенос теплоты теплопроводностью через стенку;

в) теплоотдачи от наружной поверхности отопительного прибора к воздуху помещения. Интенсивность этого процесса определяет коэффициент теплоотдачи K .

Расчет теплопередачи состоит в определении теплового потока между теплоносителями через стенку, разделяющую их

$$Q = K \cdot F_{\text{пр}} (t_{\text{пр}} - t_{\text{в}}), \text{ Вт} \quad (1)$$

где K – коэффициент теплопередачи отопительного прибора, Вт/(м²·К) – тепловой поток, переданный от горячего теплоносителя, к холодному через разделяющую стенку при температурном напоре, равном единице;

F – расчетная поверхность нагрева прибора, м²;

$(t_{\text{пр}} - t_{\text{в}})$ – средний температурный напор – разность между средней температурой воды $t_{\text{пр}}$ и температурой воздуха в помещении $t_{\text{в}}$, °С.

Коэффициент теплопередачи через стенку отопительного прибора определяется по формуле для плоской стенки

$$K = \frac{1}{R} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{в}}} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_{\text{н}}}}, \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}, \quad (2)$$

где R – термическое сопротивление теплопередачи, (м²·К)/Вт;

$1/\alpha_{\text{в}}$ – термическое сопротивление теплоотдачи от горячей жидкости к стенке, для воды $\alpha_{\text{в}} = 3500$ Вт/(м²·К);

$\frac{\delta}{\lambda}$ – термическое сопротивление стенки, (м²·К)/Вт ($\delta = 0,005$ м для чугунных литых радиаторов, для чугуна $\lambda = 40$ Вт/(м·К);

$1/\alpha_{\text{н}}$ – термическое, сопротивление теплоотдачи от внешней поверхности приборов к воздуху помещения (м²·К)/Вт.

Так как $1/\alpha_{\text{в}}$ и $\frac{\delta}{\lambda}$ очень малы по сравнению с величиной $1/\alpha_{\text{н}}$, то на практике коэффициент теплопередачи нагревательного прибора представляют зависящим в основном от $\alpha_{\text{н}}$, т.е. $K \approx \alpha_{\text{н}}$.

Тепловой поток от наружной поверхности отопительного прибора к воздуху помещения определяют из основного уравнения теплоотдачи - формулы Ньютона-Рихмана

$$Q = \alpha_n \cdot F_{\text{пр}} (t_c - t_v), \text{Вт} \quad (3)$$

где α_n – коэффициент теплоотдачи от наружной, поверхности прибора к воздуху помещения, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ - тепловой поток, переданный от единицы теплоотдающей поверхности к воздуху при температурном напоре, равном единице;

$t_c - t_v$ – температурный напор, который определяется разность между средней температурой поверхности прибора t_c средней температурой воздуха t_v .

В практике теплотехнических расчетов нагревательных приборов оперируют величиной поверхности нагревательных приборов в эквивалентных квадратных метрах (экм) и значением удельного съема теплоты $q_{\text{экм}}$ Вт/экм. Преимущество исчисления поверхности нагрева приборов в экм заключается в возможности простого пересчета при замене одного типа прибора другим. Кроме того, планирование заводами выпуска нагревательных приборов в экм способствует повышению технико-экономических показателей.

Эквивалентным квадратным метром называется условная поверхность нагревательного прибора, теплоотдачи которого $q_{\text{экм}}$, равна 506 Вт в окружающую среду с температурой 18 °С при средней температуре теплоносителя в приборе $t_{\text{пр}} = 0,5(95+70) = 82,5$ °С, расходе воды через нагревательный прибор $G = 4,83 \cdot 10^{-3}$ кг/с·экм и при стандартной открытой установке прибора.

Учитывая понятие экм при технических испытаниях отопительных приборов, находят его поверхность в экм по формуле

$$F = \frac{Q}{q_{\text{ЭКМ}}} \beta_1 \beta_2 \beta_3, \text{ ЭКМ}, \quad (4)$$

где Q – количество теплоты, отдаваемой прибором воздуху в помещении, Вт;

$q_{\text{ЭКМ}}$ – величина теплосъема с 1 экм, Вт/экм;

β_1 – поправочный коэффициент учитывающий число секций радиатора в нагревательном приборе (при числе секций в нагревательном приборе $\beta_1=0,95$);

β_2 – коэффициент, учитывающий остывание воды в трубах (при изменении температуры воды на входе и выходе из прибора $\beta_2=1$);

β_3 – коэффициент, учитывающий характер установки прибора (при стандартной установке $\beta_3 = 1$).

При значении $\Delta t = t_{np} - t_e$ не равном 64,5 и расходе, отличном от значения $G = 4,83 \cdot 10^{-3}$ кг/с·экм, величина теплосъема с 1 экм подсчитывается по формуле

$$q_{\text{ЭКМ}} = 2.08 \Delta t^{1.32} G_{\text{отн}}^{0.13}, \quad (G_{\text{отн}} < 1) \quad (5)$$

или

$$q_{\text{ЭКМ}} = 2.08 \Delta t^{1.32} G_{\text{отн}}^{0.03}, \quad (G_{\text{отн}} > 1) \quad (6)$$

где $G_{\text{отн}}$ – относительный расход воды, определяемый как

$$G_{\text{отн}} = \frac{G_{\text{в}}}{G} = \frac{G_{\text{в}}}{4,83 \cdot 10^{-3}} \quad (7)$$

где $G_{\text{в}}$ – массовый расход воды через нагревательный прибор, кг/с.

4 МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТЕПЛООТДАЧИ И ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ

ОТОПИТЕЛЬНОГО ПРИБОРА

Количество теплоты Q , отдаваемое отопительным прибором в помещении равно

$$Q = G_{\text{в}} c (t_{\text{ж1}} - t_{\text{ж2}}) \quad (8)$$

где $G_{\text{в}} = \rho_{\text{в}} V$ – массовый расход воды через нагревательный прибор, кг/с. Объемный расход воды V , м³/с определяется из эксперимента;

$\rho_{\text{в}}$ – плотность воды, $\rho_{\text{в}} = 1000$ кг/м³.

$t_{\text{ж1}}, t_{\text{ж2}}$ – температура воды на входе в прибор и на выходе из него, определяется из эксперимента, °С;

c – теплоемкость воды ($c = 4190$ Дж/(кг·К)).

Коэффициенты теплопередачи и теплоотдачи находят из уравнений (1) и (2), подставляя в них значение, теплового потока из формулы (8)

$$K = \frac{G_{\text{в}} c (t_{\text{ж1}} - t_{\text{ж2}})}{F_{\text{пр}} \left(\frac{t_{\text{ж1}} - t_{\text{ж2}}}{2} - t_{\text{в}} \right)}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}) \quad (9)$$

$$\alpha_{\text{н}} = \frac{G_{\text{в}} c (t_{\text{ж1}} - t_{\text{ж2}})}{F_{\text{пр}} (t_{\text{с}} - t_{\text{в}})}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}) \quad (10)$$

где $t_{\text{с}}, t_{\text{в}}$ – соответственно температуры поверхности стенки и воздуха, определяются из эксперимента.

5 ЭСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Экспериментальная установка представляет, собой чугунный радиатор центрального отопления типа М-140, через который проходит горячая вода из системы отопления. Температура воды на входе и выходе из отопительного прибора и температура; воздуха в помещении определяются при помощи ртутных термометров. Температура поверхности нагреватель-

ного прибора измеряется с помощью термопар, подключённых через переключатель к милливольтметру. Расход воды через прибор измеряется водомером типа УВК-25.

6 ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

6.1 Выписать из методических указаний в бланк, отчета цель работы, задание, краткую методику эксперимента, приготовить таблицу записи показаний приборов (таблица 7).

6.2 Записать начальное показание водомера V_1 и время начала отсчета по водомеру.

6.3 С помощью переключателя включать поочередно все термопары, горячие спаи которых зачеканены на поверхности нагревательного прибора. Для каждой из них фиксировать значения ЭДС по милливольтметру с интервалом в 3-5 мин до тех пор, пока величина ЭДС для каждой термопары не будет, изменяться во времени, что свидетельствует о наступлении стационарного режима.

6.4 На стационарном режиме записать в таблицу три замера ЭДС термопар и температур горячей воды на входе и выходе из прибора, температуры воздуха в помещении с интервалом в 3-5 минут.

6.5 Занести конечное показание водомера V_2 и время конца отсчета τ_1 . Вычислить объемный расход воды через прибор

$$V = \frac{V_2 - V_1}{\tau_2 - \tau_1} \quad (11)$$

Таблица 7 – Результаты измерений

Определяемые величины	Обозначения	Единица измерения	Замеры		
Температура окружающего воздуха ЭДС	E_e	мВ			
Температуре окружающего воздуха	t_e	°С			

Термопары		ЭДС по прибору	E_{n1}	мВ			
		Суммарная ЭДС ($E_{n1}+E_{\theta}$)	E_{c1}	мВ			
		Температура поверхности	t_{c1}	°С			
		ЭДС по прибору	E_{n2}	мВ			
		Суммарная ЭДС ($E_{n2}+E_{\theta}$)	E_{c2}	мВ			
		Температура поверхности	t_{c2}	°С			
		ЭДС по прибору	E_{n1}	мВ			
		Суммарная ЭДС ($E_{n3}+E_{\theta}$)	E_{c3}	мВ			
		Температура поверхности	t_{c3}	°С			
Показания водомера		$V_2 - V_1$	м ³				
Время отсчёта		$\tau_2 - \tau_1$	с				
Температура воды	ВХОД	$t_{ж1}$	°С				
	ВЫХОД	$t_{ж2}$	°С				

7 ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

7.1 По формуле (8) рассчитывается количество теплоты, отдаваемое прибором воздуху в помещении.

7.2 Используя формулу (9), определить коэффициент теплопередачи K ($F_{np} = 1.53 \text{ м}^2$).

7.3 С помощью градуировочной таблицы по суммарной ЭДС (ЭДС по прибору E_n плюс ЭДС, соответствующая температуре окружающего воздуха E_{θ}) определить температуры поверхности трубы в местах зачеканки термопар. Вычислить среднюю температуру

$$t_c = \frac{t_{c1} + t_{c2} + t_{c3}}{3} \quad (12)$$

7.4 Найти величину относительного расхода

$$G_{отн} = \frac{G_{\theta}}{4.83 \cdot 10^{-3}} \quad (13)$$

7.5 Вычислить величину коэффициента теплоотдачи от внешней поверхности прибора к воздуху (формула 10).

7.6 На основании формул (5) или (6) вычислить значение теплосъема.

7.7 По формуле (4) определить площадь нагревательного прибора в экм.

7.8 Полученные данные при испытании отопительного прибора, сравнить со справочными данными отопительного прибора типа М-140. Площадь нагрева одной из секций прибора равна 0,31 экм.

ОТЧЕТ ПО РАБОТЕ

Отчет о выполненной работе должен содержать:

- 1 Цель работы.
- 2 Методику экспериментального определения коэффициента теплопередачи.
- 3 Таблицу 7.
- 4 Результаты обработки экспериментальных данных.
- 5 Сопоставление со справочными данными.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1 Дайте определение коэффициентов теплопередачи и теплоотдачи. Приведите основные уравнения теплопередачи и теплоотдачи.

2 Дайте определение термического сопротивления радиатора. Из каких частных термических сопротивлений оно состоит? Как называется величина обратная термическому сопротивлению теплопередачи?

3 Почему практически коэффициент теплопередачи, через отопительный прибор равен коэффициенту теплоотдачи?

4 Что такое эквивалентный квадратный метр?

5 Как определяется поверхность нагревательного прибора в экм?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №7 «ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВО ВЛАЖНОМ ВОЗДУХЕ»

1 ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Исследование расчет процессов подогрева, и увлажнения влажного воздуха.

2 ЗАДАНИЕ

2.1 С помощью климатического шкафа SKP 25/200 провести исследование изменения параметров воздуха в процессах его подогрева и увлажнения.

2.2 Изобразить, графически эти процессы в i-d диаграмме. Изобразить теоретический процесс сушки.

2.3 Определить с помощью i-d диаграмм все основные параметры воздуха для начальной и конечной точек процессов.

2.4 Произвести расчет теоретического и действительного процессов сушки.

2.5 Составить отчет по выполненной работе.

3 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Влажный воздух представляет собой смесь сухого воздуха с водяным паром. Обычно расчеты, связанные с влажным воздухом, выполняются при давлениях, близких к атмосферному. В этом случае парциальное давление водяного пара в воздухе обычно невелико, поэтому для влажного воздуха можно применять формулы справедливые для идеальных газов. Давление влажного воздуха, как смеси определяется законом Дальтона.

$$P = P_n + P_g \quad (1)$$

где P_n – парциальное давление пара;

$P_{\text{с}}$ – парциальное давление сухого воздуха.

Основными параметрами влажного воздуха являются:

а) Абсолютная влажность ρ_n , кг/м³ – плотность пара при его парциальном давлении P_n и температуре влажного воздуха.

б) Относительная влажность φ - отношение абсолютной влажности воздуха при данной температуре к его максимально возможной при той же температуре.

$$\varphi = \frac{\rho_n}{\rho_n} \cong \frac{P_n}{P_n} \quad (2)$$

где ρ_n – максимально возможное количество пара при данной температуре в 1 м³ насыщенного водяного пара при температуре влажного воздуха (плотность сухого насыщенного пара определяется по таблицам насыщенного пара по данной температуре влажного воздуха);

P_n – давление насыщенного водяного пара при температуре влажного воздуха.

в) Влагосодержание - отношение массы водяного пара к массе сухого воздуха

$$d = G_n / G_{\text{с.в.}}, \text{ г/кг сух. возд.} \quad (3)$$

г) Энтальпия влажного воздуха как теплоносителя равна сумме энтальпий сухого воздуха и водяного пара

$$i = i_R + di_n, \text{ кДж/кг сух. возд.} \quad (4)$$

В расчетах влажного воздуха широкое применение получила диаграмма i - d (рисунок 7).

Разнообразные процессы тепломассообмена сопровождаются, как правило, нагреванием, охлаждением, увлажнением или осушением воздуха. Процесс нагреваний воздуха в рекуперативном теплообменнике (калорифере) происходит без изменения его влагосодержания, т.е. при $d = \text{const}$. На i - d диаграмме этот процесс изображается вертикалью, проведенной

от точки, характеризующей начальное состояние воздуха до точки, соответствующей его конечному состоянию при заданной температуре (процесс $A-B$).

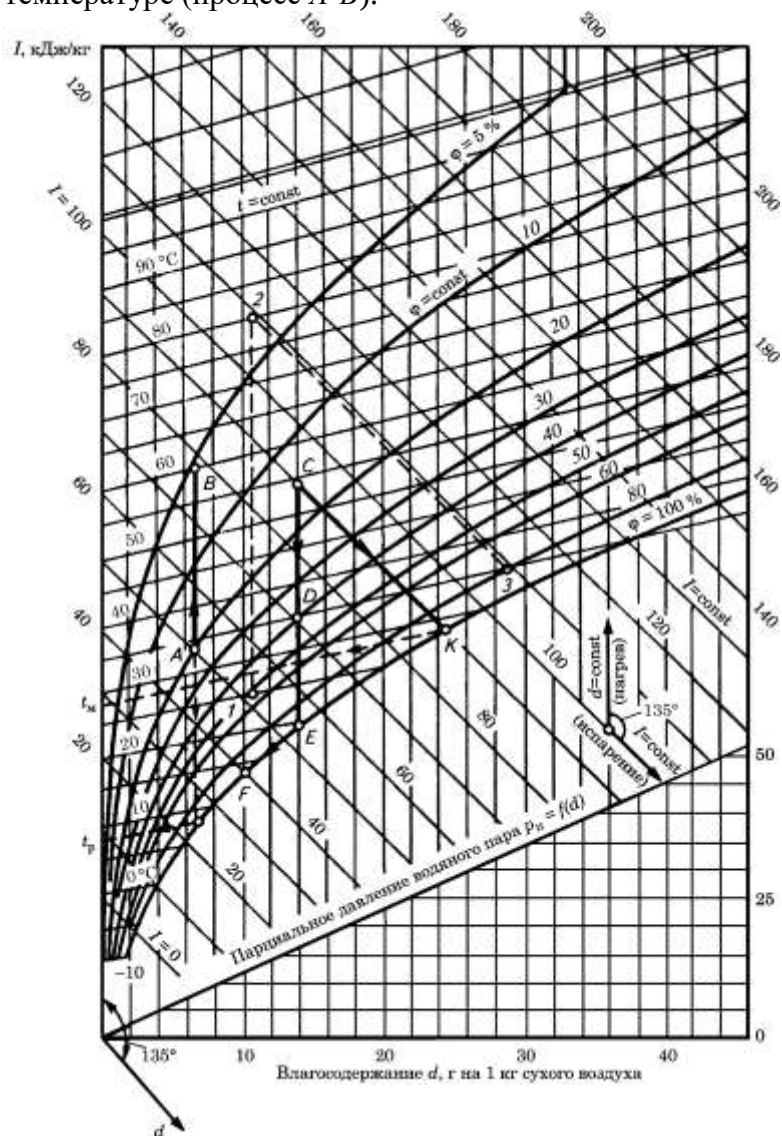


Рисунок 7 – I — d -Диаграмма влажного воздуха

Процесс охлаждения воздуха в рекуперативном теплообменнике также происходит без изменения его влагосодержания, если при охлаждении понижение температуры воздуха незначительно и не сопровождается выпадением влаги. На диаграмме изображается, вертикалью направленной вниз. Если охлаждение воздуха продолжать до состояния, соответствующего пересечению вертикали с линией $\phi=100\%$ (точка Е), то такое соответствует насыщению воздуха водяными парами в процессе при $d=const$ и температура, соответствующая этому состоянию, называется температурой точки росы t_p .

Охлаждение воздуха ниже точки росы приводит к конденсации водяного пара и выпадению его в виде росы, т.е. к осушению влажного воздуха. Процесс осушения воздуха изображается на диаграмме линией, совпадающей с линией ϕ , равно 100% и направленной влево от точки росы до пересечения с изотермой, соответствующей конечной температуре охлаждения воздуха (процесс $E-F$).

Количество сконденсировавшейся влаги на 1 кг сухого воздуха выражается разностью влагосодержания, соответствующих точкам начала и конца процесса (d_E-d_F).

Процесс испарения влаги из высушиваемого материала или теоретический процесс сушки происходит по адиабате, т.е. без потерь теплоты и подвода ее извне. В этом случае теплота, необходимая для испарения влаги, поступает из воздуха являющегося единственным источником теплоты. Воздух, отдавая тепло, охлаждается и одновременно поглощает пары влаги, в результате чего происходит увеличение его влагосодержания и относительной влажности. При полном насыщении воздуха ($\phi = 100\%$) температура воздуха станет равной температуре испаряющейся воды. Эта температура называется температурой мокрого термометра t_m . Таким образом, температура мокрого термометра - это температура адиабатного насыщения воздуха.

Если принять, что энтальпия воды равна нулю, то теплота воздуха, затраченная на испарение воды, возвратится обратно

в воздух вместе с испаренной влагой, поэтому энтальпия влажного воздуха будет в процессе испарения величиной постоянной, т.е. $I_1 = I'_2$. (процесс C-K).

В действительной сушилке могут иметь место потери теплоты например, в окружающую среду и подвод теплоты, например, нагрев воздуха в калориферах, установленных в самой сушильной камере, и за счет физической теплоты влаги (учитываются величиной поправки Δ). Для одного кг воздуха энтальпия в конце процесса сушки I_2 может быть выражена как

$$I_2 = I_1 + \frac{\Delta}{l} \quad (5)$$

где I_1 – энтальпия воздуха в начале процесса сушки;

l – расход воздуха в кг на 1 кг испаренной влаги, или

$$l = \frac{1000}{d_2 - d_1} \text{ кг воздуха на кг испаренной влаги.}$$

При работе действительной сушилки могут иметь место следующие три случая:

а) $\Delta = 0$, потери теплоты компенсируются количеством дополнительно введенной теплоты, при этом $\Delta = l(I_2 - I_1) = 0$, т.к. $l \neq 0$, то $I_2 = I_1 = \text{const}$, т.е. процесс сушки идет при постоянной энтальпии сушильного агента, как в теоретической сушилке;

б) $\Delta > 0$, дополнительный подвод теплоты превышает потери, при этом $\Delta = l(I_2 - I_1) > 0$ и, следовательно, $I_2 > I_1$ или $I_2 = I_1 + \Delta/l$. Энтальпия в конце процесса больше, чем в начале процесса;

в) $\Delta < 0$, потери теплоты превышают количество дополнительно введенного теплоты, т.е. $\Delta = l(I_2 - I_1) < 0$ и $I_2 > I_1$

или $I_2 = I_1 - \Delta / l$ - энтальпия воздуха в конце процесса сушки меньше, чем в начале процесса. Этот случай наиболее распространен в технике сушки.

4 МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ВО ВЛАЖНОМ ВОЗДУХЕ

Исследование процессов во влажном воздухе проводят с помощью климатического шкафа SKP 25/200.

По приборам, которые расположены на пульте управления климатического шкафа (рисунок 8), определяют температуру и относительную влажность воздуха (процесс сушки), определяют параметры воздуха и производят расчет действительного и теоретического процессов сушки.

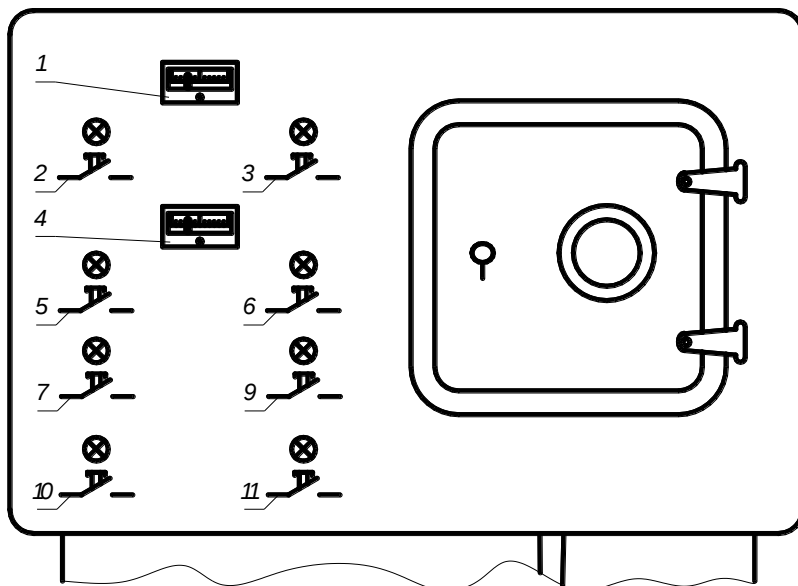


Рисунок 8 – Климатического шкафа SKP 25/200

5 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

В климатическом шкафу установлены следующие рабочие агрегаты: рабочая камера, агрегат нагрева, агрегат охлаждения, агрегат увлажнения и зажимные щитки. Для включения шкафа и его обслуживания предназначены следующие органы управления:

а) главные органы, расположенные на пульте управления - главный выключатель «вкл», «выкл», сигнальная лампочка.

б) органы управления температурой, расположенные на пульте управления - регулятор температуры, выключатель нагрева, выключатель охлаждения, выключатель вентилятора, сигнальная лампочка обогрева, сигнальная лампочка охлаждения.

в) органы управления влажностью, расположенные на пульте управления - регулятор относительной влажности, выключатель влажности, выключатель осушки, лампочка сигнальной влажности, лампочка сигнальной осушки.

6 ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

..

6.1 Все выключатели установлены в положение «выкл».

6.2 Главный выключатель установить в положение «вкл». Таким образом, узлы управления подготовлены к выполнению своих функций три минуты спустя.

6.3 После достижения стационарного состояния, о чем судят по постоянству показаний приборов, записать показания начальной температуры и начальной относительной влажности в рабочей камере.

6.4 На регуляторе температуры поставить требуемые значения температуры (порядка $+40...+50$ °С).

6.5 Включить выключатель «нагревающий вентилятор» и «нагревание», при этом должны загореться соответствующие сигнальные лампочки. Если температура в камере должна быть выше температуры окружающего воздуха на $+15...+20$

°С, установить требуемую температуру следует, ступенчато. Если, например, температура в камере должна быть +60 °С, а температура окружающей среды +20 °С, то необходимо установить регулятор температуры на + 30 °С, включить нагрев и, после достижения требуемой температуры, подождать три полных цикла терморегуляции, переставить температуру на регуляторе температур на +40 °С и поступать как описано выше. То же повторить для температуры +50 °С. При нагревании воздуха в камере относительная влажность уменьшается.

6.6 После достижения требуемой температуры выключить нагревание и записать показания приборов (значение температуры и относительной влажности t , φ).

6.7 Быстро открыть дверцу шкафа, внести в рабочую камеру высушиваемый материал и быстро закрыть дверцу.

6.8 Наблюдать, за процессом сушки по показаниям приборов: относительная влажность воздуха увеличивается, а его температура уменьшается.

6.9 Результаты наблюдения внести в таблицу 8.

Таблица 8 –Результаты экспериментальных измерений и обработки данных с помощью диаграмм

Начальные параметры воздуха				Параметры после нагревания				Параметры после увлажнения в действии-				Параметры после увлажнения в теоретическом			
φ_0 , %				φ_1 , %				φ'_2 , %				φ_2 , %			
t_0 , °С				t_1 , °С				t'_2 , °С				t_2 , °С			
I_0 , кДж/кг				I_1 , кДж/кг				I'_2 , кДж/кг				I_2 , кДж/кг			
d_0 , г/кг				d_1 , г/кг				d'_2 , г/кг				d_2 , г/кг			
P_{n0} , Н/м ²				P_{n1} , Н/м ²				P'_{n2} , Н/м ²				P_{n2} , Н/м ²			

$t_{p0}, ^\circ\text{C}$				$t_{p1}, ^\circ\text{C}$				$t'_{p2},$				$t_{p2}, ^\circ\text{C}$			
								$^\circ\text{C}$							

7 ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

7.1 По значениям начальных температур и относительной влажности, на диаграмму $i-d$ наносят точку, характеризующую начальное состояние воздуха: влагосодержание, энтальпию, парциальное давление водяных паров, температуру точки росы.

7.2 По полученным результатам на диаграмме изображают процессы подогрева и увлажнения воздуха (процесс сушки). Полученные результаты сравнивают с теоретическими процессами нагревания и увлажнения воздуха.

7.3 Объяснить причину изменения параметров воздуха при его нагревании и увлажнении.

7.4 Произвести расчет теоретического и действительного процессов сушки, анализ результатов расчета и сделать выводы.

В расчете процесса сушки (теоретического и действительного) определяются:

а) количество влаги в г, испаренной 1 кг воздуха d_1-d_0 где d_2 – влагосодержание воздуха в конце процесса сушки (теоретического), а в случае действительного d'_2 , d_0 – влагосодержание в начале процесса сушки.

б) расход воздуха на 1 кг испаренной влаги

$$l = \frac{1000}{d_2 - d_0}$$

в) расход теплоты на 1 кг испаренной влаги

$$q = l(I_1 - I_0), \text{ кДж/кг}$$

г) количество влаги, испаренной из влажного материала воздухом, находящимся в рабочем объеме камеры шкафа

$$m = \frac{L}{l} = \frac{165(d_2 - d_0)}{1000}, \text{ г влаги,}$$

где L – масса воздуха, находящегося в рабочем объеме, г;

$$L = \rho V$$

V – рабочий объем камеры равен $0,15 \text{ м}^3$;

ρ – плотность воздуха равна $1,1 \text{ кг/м}^3$.

ОТЧЕТ ПО РАБОТЕ

Отчет по выполненной работе должен содержать:

- 1 Цель работы.
- 2 Методику экспериментального исследования процессов во влажном воздухе.
- 3 Рисунок 8 и таблицу 8.
- 4 Диаграмму $i-d$ с изображением процессов подогрева и увлажнения воздуха.
- 5 Результаты обработки экспериментальных данных.
- 6 Сопоставление результатов расчета для действительного и теоретического процессов сушки.
- 7 Выводы.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 1 Что называется влажным воздухом?
- 2 Что называется насыщенным и ненасыщенным влажным воздухом?
- 3 Закон Дальтона применительно к влажному воздуху.
- 4 Что называется абсолютной влажностью?
- 5 Что называется влагосодержанием воздуха?
- 6 Что называется относительной влажностью воздуха?
- 7 Что называется температурой точки росы?
- 8 Какой линией изображается в $i-d$ диаграмме процесс нагревания воздуха в рекуперативном теплообменнике?
- 9 Какой линией изображается в $i-d$ диаграмме процесс охлаждения?
- 10 Как получить состояние влажного воздуха, соответствующее точке росы?

11 К чему приводит охлаждение воздуха ниже точки росы?

12 Чем выражается количество сконденсировавшейся влаги на 1 кг сухого воздуха?

13 Какой линией изображается на $i-d$ диаграмме теоретический процесс сушки?

14 Почему в теоретической сушилке; энтальпия остается постоянной несмотря на уменьшение его температуры в процессе сушки?

15 Почему (с физической точки зрения) в действительной сушилке при $\Delta > 0$ энтальпия выходящего из сушилки воздуха больше чем выходящего?

16 Чем выражается количество теплоты, необходимое для подогрева 1 кг воздуха в калорифере?

17 Как определяется количество теплоты, необходимое для подогрева 1 кг воздуха в калорифере?

18 Как определить расход воздуха и расход теплоты на 1 кг испаренной влаги?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №8

«ИЗОХОРНОЕ НАГРЕВАНИЕ ВОДЫ И ВОДЯНОГО ПАРА»

1 ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Экспериментальное исследование процесса изохорного, нагревания воды и водяного пара.

2 ЗАДАНИЕ

2.1 Определить с помощью экспериментальной установки зависимости между давлением и температурой воды в двухфазной и однофазной областях в процессе изохорного нагревания при значении удельного, объема меньшем и большем критического.

2.2 Построить график процесса изохорного нагревания воды и водяного пара в $p-v$ и $p-T$ диаграммах.

3 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

3.1 Реальные газы отличаются от идеальных тем, что молекулы газов имеют конечные собственные объемы и связаны между собой силами взаимодействия.

Особенно велико влияние этих сил у веществ близких к переходу от газообразного к жидкому состоянию, что имеет место в данном эксперименте. Качественные особенности реальных газов и их отличие от идеальных отражает уравнение состояния Ван-дер-Ваальса

$$\left(p + \frac{a}{v}\right)(v - b) = RT \quad (1)$$

где b – наименьший объем до которого можно сжать газ;
 $p = a/v$ - внутреннее давление.

Если в идеальном газе молекулы свободны в своем движении и удары молекул о стенки сосуда ничем не ограничены, то в реальном газе при наличии сил взаимодействия между молекулами сила ударов будет меньше и прямо пропорциональна числу как притягиваемых, так и притягивающих молекул, т.е. квадрату плотности газа $\alpha\rho^2$ или α/v^2 .

3.2 В данной работе исследуется процесс изохорного нагревания воды, начальное состояние которой находится в двухфазной области (рисунок 9).

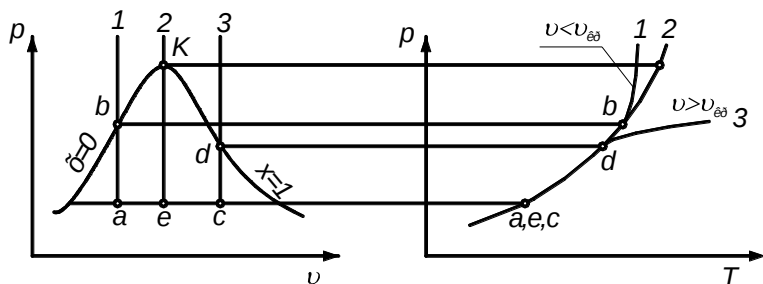


Рисунок 9 –Процесс изохорный нагрева воды

До тех пор, пока процесс протекает в двухфазной области (участок ab изохоры 1 на рисунке 9), давление воды в каждой точке процесса равняется давлению насыщенного пара при соответствующей температуре.

Если удельный объем воды меньше критического (изохора I), то изохорное нагревание приводит к полной, конденсации пара в результате - чего изохора в $p-v$ диаграмме пересечет нижнюю пограничную кривую. При дальнейшем нагревании вода будет находиться в однофазном (жидком) состоянии и зависимость между температурой и давлением принимает характерный для жидкости вид - резкий рост давления при незначительном изменении температуры. Если же удельный объем вод больше критического (изохора III), изохора пересекает верхнюю пограничную кривую, т.е. насыщенный пар переходит в состояние перегретого пара. Таким образом, в однофазной области изохоры для значений удельного объема,

меньших критического располагаются в p - T - диаграмме выше и левее кривой насыщения, а для значений больших критического - ниже и правее кривой насыщения.

При изохорном нагревании воды, удельный объем которой равен, критическому (изохора II) двухфазное состояние сохраняется вплоть до критической точки где и происходит переход вещества в однофазное (сверхкритическое) состояние.

3.3 Для того, чтобы иметь полное представление о веществе, надо знать его удельный объем, энтальпию, теплоемкость и другие термодинамические свойства. Однако нет необходимости все эти свойства каждый раз определять экспериментально, так как все термодинамические свойства реальных веществ находятся тесной взаимосвязи.

Эта взаимосвязь устанавливается дифференциальными уравнениями термодинамики. Они позволяют при наличии экспериментальных данных по одному из свойств вещества вычислить все его остальные свойства, и провести их согласование.

В частности, в данной работе после точного определения удельного объема однофазной области представляется возможность, определить внутреннее давление, в уравнении Ван-дер-Ваальса по формуле

$$\Delta p = \left(\frac{\partial u}{\partial v} \right)_T = T \left(\frac{dp}{dT} \right) - p \quad (2)$$

4 МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

В основе экспериментального исследования вида изохор реального вещества - воды, лежит метод нагрева ее в закрытом сосуде. При строгом проведении эксперимента следовало бы производить запись показаний приборов при равновесном состоянии пара в сосуде. Проведение такого эксперимента тре-

бует длительного времени и поэтому нагрев ведут медленно, но непрерывно, производя ряд одновременных измерений температуры и давления.

5 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Основным элементом экспериментальной установки (рисунки 10) является толстостенный сосуд 1, изготовленный из нержавеющей стали, в котором заключено некоторое количество воды. Снаружи сосуд обогревается при помощи электрического нагревателя из нихромовой проволоки. Нагреватель электрически изолирован от сосуда слоем слюды. Сосуд вместе с нагревателем снаружи покрыт слоем тепловой изоляции и помещен в металлический кожух. Мощность измеряется ваттметром 3. Температура пара во время эксперимента измеряется хромель-алюмелевой термопарой. Отсчет показаний производится милливольтметром 2. Для измерения давлений применяется образцовый трубчатый манометр 6 соединенный с сосудом трубкой высокого давления 5.

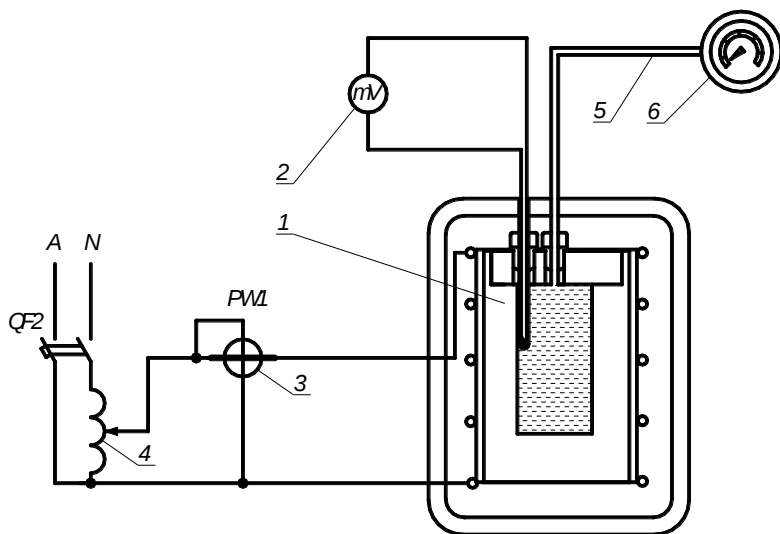


Рисунок 10 – Установка для исследования изохорного процесса нагрева воды и водяного пара

6 ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

6.1 Включить электронагреватели обоих сосудов и начать подогрев воды в них.

6.2 Записать в бланк отчета по лабораторной работе цель работы, задание, краткую методику проведения эксперимента. Заготовить таблицы для записи показаний приборов отдельно для левого и правого сосудов.

6.3 Через каждые 3-5 мин одновременно производить измерения давлений по манометрам и термоэдс термопар с помощью милливольтметра для обоих сосудов. Показания приборов записать в таблицы.

6.4 После прохождения, точки отрыва от кривой насыщения (отмечена синей точкой на манометрах), регулируя мощность электронагревателя, выждать пока температура по всему объему станет одинаковой и так же как и давление будет неизменным в течение некоторого времени (так называемое равновесное состояние). Получить. 2-3 таких равновесных состояния и для каждого из них записать в таблицы показаний приборов.

6.5 С помощью ртутного термометра измерить температуру окружающего воздуха.

7 ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

7.1 С помощью градуировочной таблицы определить температуре окружающего воздуха соответствующую ЭДС для термопары хромель-алюмелевыми определить, при которой находятся холодные спаи термопар (величину поправки на температуру, холодных спаев термопары E_s).

7.2 Просуммировать величину этой поправки с ЭДС, измеренной милливольтметром.

7.3 По суммарной ЭДС с помощью градуировочной, таблицы определить температуру воды.

7.4 Для каждой экспериментальной точки записать в таблицу давление насыщения p по температуре.

7.5 По результатам эксперимента построить в системе координат p, T зависимость между температурой и давлением для двух изохор. В этой же системе координат p, T изобразить кривую насыщения для воды от начальной температуры до критической.

7.6 Определить точки отрыва от кривой насыщения для двух изохор (значения температуры T и давления p).

7.7 Пользуясь по давлениям насыщения для изохоры $v < v_{кр}$ выписать значения удельных объемов v' на нижней пограничной кривой, а для изохоры $v > v_{кр}$ по давлению насыщения выписать значения объемов v'' на верхней пограничной кривой. По этим данным в системе координат p, v построить верхнюю и нижнюю пограничные кривые.

7.8 Из точек отрыва в системе координат p, T провести горизонтальные прямые до пересечения с нижней пограничной кривой для изохоры $v < v_{кр}$ (объем v' при давлении $p_{отр}$) и с верхней пограничной кривой для изохоры $v > v_{кр}$ (объем $v < v_{кр}$ " при давлении $p_{отр}$) в системе координат p, v . Найти значения удельных объемов для этих изохор и провести эти изохоры в системе координат p, v .

7.9 По значениям давления и температуры для каждого равновесного состояния перегретого пара после точки отрыва для изохоры $v > v_{кр}$ определить значения удельных объемов, а затем среднее значение удельного объема для этой изохоры. Сопоставить полученные значения со значением удельного объема из диаграммы p, v .

7.10 Для любой экспериментальной точки исследованных изохор, относящейся к двухфазной области, вычислить степень сухости пара x

$$x = \frac{v_x - v'}{v'' - v'} \quad (3)$$

78

7.11 Для одной из экспериментальных точек в области воды при давлении 100...200 бар и для одной из точек в области пара рассчитать величину внутреннего давления по формуле (2).

Величину $(dp/dT)_0$ при выбранном значении измеренного давления p определить графически по построенной p - T - диаграмме как тангенс угла наклона касательной к кривой в данной точке.

7.12 Рассчитать величину внутреннего давления по уравнению Ван-дер-Ваальса a/v^2 , где

$$a = \frac{27}{64} \cdot \frac{R^2 T_K^2}{P_K} = 1700, (\text{Н} \cdot \text{м}^4)/\text{кг}^2,$$

так как

$$R = \frac{8314.20}{18} = 461.5 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$$

где T_K и P_K - критические параметры воды.

Сопоставить данное значение с величиной, полученной по экспериментальным, данным.

Таблица 9 – Экспериментальные данные

Левый сосуд						Правый сосуд					
избыточное давление по манометру, Р кг/см ²	абсолютное давление пара, Р, бар	температура окружающего воздуха, °С	показание термометры, мВ	суммарная ЭДС, мВ	температура пара, °С	избыточное давление по манометру, Р кг/см ²	абсолютное давление пара, Р, бар	температура окружающего воздуха, °С	показание термометры, мВ	суммарная ЭДС, мВ	температура пара, °С

ОТЧЕТ ПО РАБОТЕ

Отчет по выполненной работе должен содержать:

- 1 Цель работы, задание.
- 2 Методику экспериментального определения изохор воды.
- 3 Рисунок 10 и таблицу 9.
- 4 Обработку результатов эксперимента с необходимыми расчетами.
- 5 Графики изохор в p , v - и p , T -координатах с нанесенными пограничными кривыми.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 1 Что такое реальный газ? В чем его отличие от идеального газа?
- 2 Напишите уравнение состояния реального газа. Что означают постоянные a и b ?
- 3 Изобразите p - v диаграмму водяного пара. Что такое нижняя и верхняя пограничные кривые?
- 4 Что такое критическая точка? Назовите критические параметры для воды.
- 5 Проведите анализ изохор воды и водяного пара при значениях удельного объема меньшем и большем критического в диаграммах p , v - и p , T .
- 6 Что такое кривая насыщения, как производится ее построение в диаграмме p , T ?
- 7 Чем объясняется отклонение экспериментальных изохор в двухфазной области состояния вещества от кривой насыщения?
- 8 Что такое внутреннее давление и как его определить?
- 9 Что такое степень сухости пара и как ее определить?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Амерханов Р.А., Драганов Б.Х., Теплотехника: Учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп [Текст]. – М.: Энергоатомиздат, 2006. – 432 с.
2. Амерханов Р.А., Бессараб А.С., Драганов Б.Х., Рудобашта С.П., Шишко Г.Г. Теплотехнические установки и системы сельского хозяйства / Под ред. Б.Х. Драганова [Текст]. – М.: Колос-Пресс, 2002. – 423 с.
3. Амерханов Р.А., Драганов Б.Х. Проектирование систем теплоснабжения сельского хозяйства: Учеб. для вузов /Под ред. Б.Х. Драганова [Текст]. –Краснодар: 2001. –200 с.
4. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача [Текст]. – М.: Энергоиздат, 1981. – 416 с.
5. Юдаев Б.Н. Теплопередача [Текст]. - М.: Высшая школа., 1981. - 320 с.
6. Кушнырев В.И., Лебедев В.И., Павленко А.В. Техническая термодинамика и теплопередача [Текст]. -М.: Стройиздат, 1986. - 464с.
7. Техническая термодинамика. /Под редакцией Крутова В.И. [Текст]. - М.: Высшая школа, 1982.
8. Драганов Б.Х., Кузнецов А.В., Рудобашта С.П. Теплотехника и применение теплоты в сельском хозяйстве. Учебник для вузов по инженерным специальностям сельского хозяйства [Текст]. -М.: Агропромиздат, 1990. - 463 с.
9. Теплотехника: Учебник для вузов/В.Н. Луканин, М.Г. Шетров, Г.М. Камфер и др.: под ред. В.Н. Луканина [Текст]: - М.: Высшая школа, 1999 – 671 с.
10. Алексеев. Г.Н. Общая теплотехника [Текст]. - М.: Высш. шк., 1980. - 552 с.
11. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена [Текст]. - М.: Атомиздат, 1979 - 416 с.
12. Беляев Н.М. Термодинамика [Текст].- К.: Высш. шк., 1987 г., - 344 с.

13. Бажан П.И., Каневец Г.Е., Селиверстов В.М. Справочник по теплообменным аппаратам [Текст]. - М.: Машиностроение, 1989 г., - 368 с.
14. Амерханов Р.А. Оптимизация сельскохозяйственных энергетических установок с использованием возобновляемых видов энергии [Текст]. –М: Колос-Пресс, 2002. –532 с.
15. Кутателадзе С.С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление. Справочное пособие [Текст]. - М.: Энергоатомиздат, - 1990. - 367 с.
16. Блох А.Г., Журавлев Ю.А., Рыжков Л.Н. Теплообмен излучением. Справочник. - М.: Энергоатомиздат, 1991. - 432 с.
17. Беляев Н.М. Основы теплопередачи [Текст]. - Киев, Выща школа, 1989. - 343 с.
18. Справочник по теплообменникам. В 2 т. Пер. с англ. Под редакцией Петухова Б.С. и Шикова В.А. [Текст]. - М.: Энергоатомиздат, 1987. т. 1 - 560 с., т. 2 - 352 с.
19. Елизаров А.Г. Отопление и вентиляция зданий и сооружений сельскохозяйственных комплексов [Текст]. - М.: Стройиздат, 1981. - 239 с.
20. Панкратов Г.П. Сборник задач по теплотехнике. Учебное пособие для инженерных специальностей вузов. - 2-е издание, переработанное и дополненное [Текст]. - М.: Высшая школа, 1986. -248 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ	3
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1 «ОПРЕДЕЛЕНИЕ СРЕДНЕЙ ТЕПЛОЕМКОСТИ ВОЗДУХА».....	4
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2 «ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ СЫПУЧЕГО МАТЕРИАЛА».....	13
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3 «ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА ПРИ СВОБОДНОМ ДВИЖЕНИИ ВОЗДУХА».....	21
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4 «ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТЕПЕНИ ЧЕРНОТЫ МАТЕРИАЛА».....	32
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5 «ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООТДАЧИ ПРИ СВОБОДНОМ ДВИЖЕНИИ ВОЗДУХА У ВЕРТИКАЛЬНОЙ ТРУБЫ».....	43
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №6 «ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТЕПЛООТДАЧИ И ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ ОТОПИТЕЛЬНОГО ПРИБОРА».	54
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №7 «ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВО ВЛАЖНОМ ВОЗДУХЕ».....	62
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №8 «ИЗОХОРНОЕ НАГРЕВАНИЕ ВОДЫ И ВОДЯНОГО ПАРА»	73
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	81

У ч е б н о е и з д а н и е

Соболь Александр Николаевич

ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА

Практикум

В авторской редакции

Подписано в печать 20.09.2020. Формат 60 × 84 1/16.

Усл. печ. л. – 4,9. Уч.-изд. л. – 3,8.

Тираж 100 экз. Заказ № 211.

Типография ООО «Крон»

350044, г. Краснодар, ул. Алма-Атинская, 14