

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«Воронежский государственный технический университет»

Кафедра теплогазоснабжения и нефтегазового дела

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

*к выполнению лабораторных работ по дисциплинам «Тепломассообмен»,
«Теплогазоснабжение с основами теплотехники», «Техническая
термодинамика и теплотехника» для студентов направлений
08.03.01 «Строительство», 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»,
21.03.01 «Нефтегазовое дело», 18.03.01 «Химическая технология»
всех форм обучения*

Воронеж 2021

ББК 31.31я7
УДК 621.184.64(07)

*Составители: В. Н. Мелькумов, Н. А. Петрикеева,
А. И. Колосов, Д. М. Чудинов*

Экспериментальное исследование процессов теплообмена:
методические указания к выполнению лабораторных работ по дисциплинам «Тепломассообмен», «Теплогазоснабжение с основами теплотехники», «Техническая термодинамика и теплотехника» для студентов направлений 08.03.01 «Строительство», 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника», 21.03.01 «Нефтегазовое дело», 18.03.01 «Химическая технология» всех форм обучения / ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»; сост.: В. Н. Мелькумов, Н. А. Петрикеева, А. И. Колосов, Д. М. Чудинов. – Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2021. – 29 с.

Изложены конструктивные особенности и техника обслуживания лабораторного теплообменного оборудования. Сделан акцент на обработке экспериментальных данных при проведении опытных испытаний.

Предназначены для студентов направлений 08.03.01 «Строительство», 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника», 21.03.01 «Нефтегазовое дело», 18.03.01 «Химическая технология» всех форм обучения.

Ил. 9. Табл. 6. Библиогр.: 4 назв.

**ББК 31.31я7
УДК 621.184.64(07)**

*Рецензент – М. Н. Жерлыкина, канд. техн. наук,
доцент кафедры жилищно-коммунального хозяйства ВГТУ*

*Печатается по решению редакционно-издательского совета
Воронежского государственного технического университета*

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	4
Определение ошибок измерений.....	5
Лабораторная работа № 1. Измерение температуры различными термометрическими приборами	5
Лабораторная работа № 2. Определение коэффициента теплопроводности изоляционного материала методом цилиндра.....	12
Лабораторная работа № 3. Определение теплоотдачи горизонтальной трубы при естественной конвекции.....	16
Лабораторная работа № 4. Определение коэффициента теплопередачи в водо-водяном (водо-воздушном) теплообменнике.....	19
Лабораторная работа № 5. Определение степени черноты поверхности металла методом сравнения	24
Библиографический список	27
Приложение. Некоторые значения физических свойств воздуха.....	28

ВВЕДЕНИЕ

Настоящие методические указания составлены в соответствии с программами курсов для выполнения лабораторных работ.

Целью каждой лабораторной работы является более глубокое усвоение материала по соответствующему разделу курса, а также приобретение необходимых навыков при работе с лабораторным оборудованием, постановке и проведении экспериментов, обработке их результатов.

К работе допускаются студенты, изучившие:

- соответствующие разделы специальных курсов и настоящие методические указания для выполнения соответствующей лабораторной работы;
- правила по технике безопасности при проведении лабораторных работ.

Кроме того, студенты должны знать:

- конструкцию экспериментальной установки и порядок проведения исследований;
- конструкцию и принцип действия измерительных средств, точность их измерений.

К выполнению работы допускаются студенты, представившие преподавателю предварительно оформленный отчет по работе с кратким изложением задач исследований, теоретической части, представлением принципиальной конструктивной схемы экспериментальной установки и таблицы для записи экспериментальных данных.

Лабораторные работы выполняются каждым студентом самостоятельно или группой из 3-5 человек (по указанию преподавателя). Каждый студент перед проведением расчетов должен провести анализ результатов экспериментальных данных с целью выявления и устранения грубых ошибок измерений.

Отчет должен содержать таблицу экспериментально-расчетных данных с подписью преподавателя. Студенту предлагается несколько вопросов, и при положительных ответах на них правильно оформленный отчет считается принятым, а лабораторная работа зачтенной. Тетрадь с оформленными лабораторными работами и отчетом сдается преподавателю.

При проведении лабораторных работ студентам запрещается:

- самостоятельно включать и выключать установку;
- изменять режимы установки;
- отсоединять измерительные приборы и элементы установки;
- прикасаться к нагретым поверхностям оборудования;
- прикасаться к элементам установки и оборудования, находящимся под напряжением.

Включение и выключение установки, изменение режима её работы осуществляется лаборантом или преподавателем.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОШИБОК ИЗМЕРЕНИЙ

Выявление грубых ошибок измерений производится следующим образом:

1. Определяется среднеарифметическое значение N_{cp} измеренных величин по формуле

$$N_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n N_i}{n} \quad (1)$$

где N_i – единичное значение измеренной величины; n – число измерений.

2. Определяется среднеквадратичная ошибка:

$$\sigma_n = \sqrt{\frac{\sum (N_i - N_{cp})^2}{(n-1)}} \quad (2)$$

3. Вычисляется величина относительного отклонения измерений, наиболее отличающаяся от среднеарифметического значения, по формуле

$$V_{max} = \left| \frac{N_{cp} - N_i}{\sigma_n} \right| \quad (3)$$

Эта величина сравнивается со значением, приведенным в таблице.

Таблица

3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25
1,41	1,96	2,27	2,46	2,61	2,71	2,8	2,87	2,93	2,98	3,03	3,1

Если полученное значение V_{max} больше значения, приведенного в таблице, то данный результат измерений является грубой ошибкой и его необходимо отбросить. Вычисления по (1) – (3) производятся до тех пор, пока оставшиеся данные измерений не будут удовлетворять требованиям в таблице. Данные измерений усреднить по формуле (1), привести в соответствие с Международной системой единиц (СИ) и продолжить обработку.

Лабораторная работа № 1

ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ РАЗЛИЧНЫМИ ТЕРМОМЕТРИЧЕСКИМИ ПРИБОРАМИ

1.1. Цель работы

Определить температуру воды в термостате при помощи:

- ртутного термометра (абсолютную температуру и температуру по шкале Фаренгейта) с учетом поправки на выступающий столбик ртути термометра;

- термоэлектрического пирометра;
- электрического термометра сопротивления;
- манометрического термометра.

1.2. Краткие теоретические сведения

Для измерения величины температуры по термометру необходима температурная шкала. В настоящее время основной температурной шкалой является стоградусная. В некоторых странах применяется шкала Фаренгейта.

Связь между температурами, отсчитанными по стоградусной шкале t ($^{\circ}\text{C}$) $t_{\phi}(\Phi)$, выражается следующим соотношением:

$$t_{\phi} = 9t/5 + 32 \quad (1.1)$$

Широкое применение также получила абсолютная (термодинамическая) шкала. Связь между температурами по абсолютной T (K) и стоградусной шкале выражается следующей формулой:

$$T = t + 273,15 \quad (1.2)$$

1.3 Определение температуры среды ртутным термометром

Чтобы найти температуру среды с помощью ртутного термометра, необходимо погрузить термометр в среду как можно глубже (до требуемого деления) и записать показание, которое и будет температурой среды. Но во многих случаях погрузить термометр в среду до требуемого деления (температура среды) не удастся. Тогда приходится вводить поправку на выступающий столбик ртути, т.е. на ту часть столбика ртути, которая выступает из среды и имеет другую температуру (рис. 1.1).

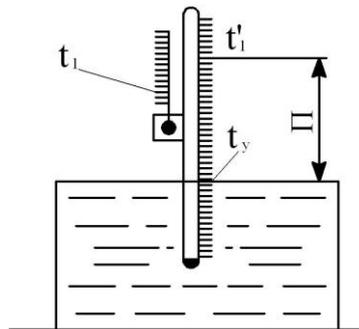


Рис. 1.1. Определение поправки на выступающий столбик ртути

С учетом этой поправки температура среды определяется по формуле

$$t = t' + \Delta t \quad (1.3)$$

где t' - показания ртутного термометра, $^{\circ}\text{C}$; Δt - поправка на температуру выступающего из среды столбика ртути, $^{\circ}\text{C}$;

$$\Delta t = n\alpha(t-t_1) \quad (1.4)$$

здесь n - число градусов на выступающем столбике ртути, °С (рис. 1.1)

$$n = t' - t_y \quad (1.5)$$

где t_y - температура глубины погружения термометра в среду (уровень погружения), °С (рис. 1.1); $\alpha = 0,00016$ - видимый коэффициент расширения ртути в стекле, $1/^\circ\text{C}$; t_1 - средняя температура выступающего столбика ртути, измеренная вспомогательным термометром, резервуар которого находится на середине высоты выступающего столбика (рис. 1.1), °С.

1.4 Определение температуры среды термоэлектрическим пирометром

Принцип работы термоэлектрического пирометра основан на том, что в цепи из двух разнообразных проводников, спаянных по концам (термопара), возникает термоэлектродвижущая сила (э.д.с.), величина которой при неизменной температуре одного из спаев зависит только от температуры другого спая. Пирометр (рис. 1.2) состоит из термопары 1 и подключенного к ней потенциометра (милливольтметра) 2. Термостатированный спай термопары называют холодным 3 (поддерживают его постоянную температуру). Другой спай 4 термопары называется горячим. Термоэлектрический пирометр снабжается градуировочной кривой $E = f(t)$ или переводной таблицей, дающей зависимость э.д.с. в цепи от температуры горячего спая, при условии, что температура холодного спая равна 0°C .

Чтобы найти температуру среды с помощью термоэлектрического пирометра, необходимо горячий спай термопары поместить в среду, температура которой определяется, а холодный спай погрузить в тающий лёд. По показанию потенциометра E , мВ, с помощью таблицы или графика находят искомую температуру среды t , °С. Однако на практике не всегда удается поддерживать температуру холодного спая термопары 0°C . Довольно часто случается, что эта температура оказывается выше 0°C . В таких случаях до отсчета температуры по градуировочной кривой показание потенциометра необходимо приводить к условиям градуировки пирометра путем введения поправки на температуру холодного спая. Эта поправка E_0 , мВ находится из той же градуировочной кривой пирометра по температуре холодного спая t_{xc} , °С, измеренной специально предусмотренным термометром, и прибавляется к показанию потенциометра E , мВ.

Приведенное к условиям градуировки показание потенциометра

$$E = E' + E_0 \quad (1.6)$$

По определенной таким образом величины э.д.с. из градуировочной кривой пирометра определяется истинная температура среды.

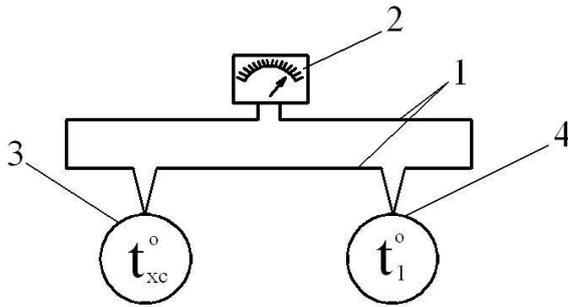


Рис. 1.2. Схема термоэлектрического пирометра:

- 1 - термопара;
- 2 - потенциометр (вольтметр);
- 3 - холодный спай термопары;
- 4 – горячий спай термопары

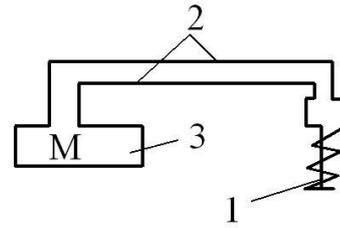


Рис. 1.3. Схема электрического термометра сопротивления:

- 1 - чувствительный элемент;
- 2 - соединительные провода;
- 3 - логометр

1.5. *Определение температуры среды электрическим термометром сопротивления*

Принцип работы электрического термометра сопротивления основан на изменении электрического сопротивления проводника с изменением его температуры.

Термометр сопротивления (рис. 1.3) включает чувствительный элемент 1, соединительные провода 2 и вторичный показывающий прибор (логометр) 3. Чувствительный элемент выполняется в виде спирали из очень тонкой платиновой или медной проволоки.

К термометру сопротивления прилагается инструкция, содержащая градуировочную кривую $R = f(t)$, выражающую зависимость сопротивления чувствительного элемента от температуры (или вторичный показывающий прибор – логометр).

При определении температуры с помощью термометра сопротивления необходимо, чтобы чувствительный элемент прибора находился в среде. О величине температуры среды судят по показанию логометра.

1.6. *Определение температуры среды манометрическим термометром*

Манометрические термометры бывают жидкостные, паровые и газовые. В жидкостные манометрические термометры обычно помещают ртуть, в паровые - жидкость, закипающую при низких температурах (спирт, ацетон, бензин и т.д.), в газовые - инертный газ (азот, гелий). В зависимости от конструкции приборов в них используются одновитковые, многовитковые, плоские и другие виды манометрических пружин.

Манометрические термометры изготавливаются показывающими и записывающими (рис.1.4). Изменение температуры контролируемой среды

воспринимается заполнителем термосистемы через термобаллон 10 и приводит к изменению давления среды, под действием которого манометрическая трубчатая пружина 1 через сектор 8 и зубчатое колесо, на котором закреплена показывающая стрелка 2, перемещает показывающую стрелку 5 относительно шкалы 6. Вместе с показывающей стрелкой перемещается поводок 4. Датчиками электрического сигнала служат два предельных контакта, один из которых 3 выдает сигнал минимального значения температуры контролируемой среды, другой 7 - максимального значения температуры контролируемой среды.

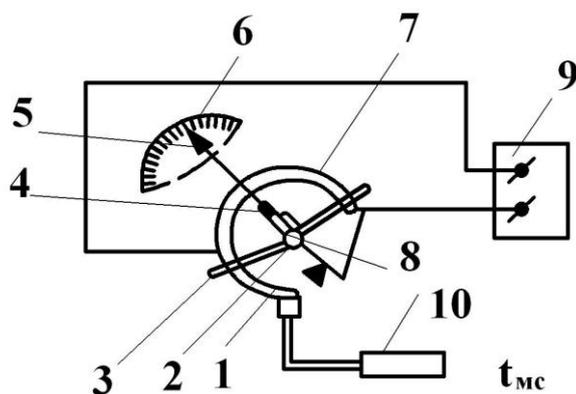


Рис. 1.4. Принципиальная схема манометрического термометра:
 1- пружина; 2 - зубчатое колесо; 3 - предельный контакт (нижний предел температуры); 4 - ведущий поводок; 5 – стрелка; 6 – циферблат; 7 - предельный контакт (верхний предел температуры); 8 – сектор; 9 - клемма для подключения проводов; 10 – термобаллон

1.7. Принципиальная конструктивная схема экспериментальной установки

Экспериментальная установка (рис. 1.5) включает термостат, ртутные термометры, термоэлектрический пирометр, термометр сопротивления, манометрический термометр.

Термостат устроен следующим образом. Цилиндрический корпус 1 с днищем имеет между стенками изоляцию 2. В бак залита вода, температуру которой надлежит измерить. Бак закрыт крышкой 3, на которой смонтированы электронагреватель 4, мешалка 5 с электромотором 6, контактный термометр 7 и реле 8. При помощи мешалки 5, приводимой во вращение электромотором 6, в баке достигается равномерность температуры воды. Контактный термометр 7 и реле 8 образуют терморегулятор, поддерживающий температуру воды в термостате на заданном уровне. Контактный термометр имеет в верхней части капилляра металлическую проволоку, которая под воздействием вращающегося магнита может перемещаться вверх или вниз. Торцевая проволока можно

установить на любом делении шкалы термометра и задать желаемый уровень температуры воды. Как только температура воды в термостате достигнет этого уровня, реле отключает нагреватель 4 (рис. 1.5). Если температура воды упадет ниже данного предела, контакт в термометре разомкнется и реле включит нагреватель. Температура воды в термостате поддерживается на заданном уровне с колебаниями не более $0,1^{\circ}\text{C}$.

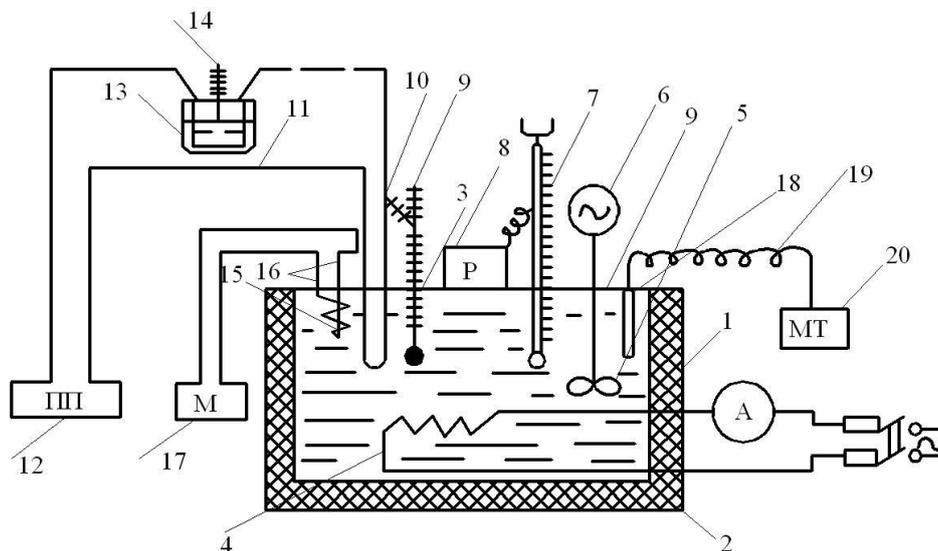


Рис. 1.5. Принципиальная схема экспериментальной установки:

- 1- цилиндрический корпус; 2 - изоляция; 3 - крышка; 4 - электронагреватель; 5 - мешалка; 6 - электромотор; 7- контактный термометр; 8 - реле; 9 - основной термометр; 10 - вспомогательный термометр; 11- термопара; 12 - потенциометр; 13 - сосуд Дьюара; 14 - ртутный термометр для измерения температуры холодного спая; 15 - чувствительный элемент термометра сопротивления; 16 - соединительные провода; 17 - логометр; 18 - термобаллон; 19 - капиллярная трубка; 20 - измерительная шкала

В установке применен основной ртутный термометр 9. Вспомогательный термометр 10 необходим для поправки на выступающий столбик ртути. Пирометр включает медь-константановую термопару 11, потенциометр 12 и сосуд Дьюара 13 с тающим льдом или водой. Холодный спай термопары и ртутный термометр 14 для измерения температуры холодного спая помещены в сосуд Дьюара. Горячий спай термопары находится в воде термостата.

К термометру сопротивления относится чувствительный элемент 15 из медной проволоки, провода 16 и логометр 17. Манометрический термометр включает термобаллон 18, капиллярную трубку 19 и измерительную шкалу 20.

1.8. Проведение экспериментальных исследований

При помощи магнитика торец проволочного контактного термометра установить по шкале этого прибора на значение температуры, которое первым выбрано для измерения. Включить электрический нагреватель. При подходе температуры к заданному пределу включить мешалку. Выждать момент, когда сработает реле, о чем можно судить по падению стрелки амперметра в цепи нагревателя на нуль или по характерному щелчку реле. Срабатывание реле означает, что температура воды в термостате достигла необходимого значения и в дальнейшем благодаря действию терморегулятора, изменяться не будет. Однако во избежание искажающего влияния тепловой инерции термометров приступить к измерениям этой температуры следует не сразу после срабатывания реле, а минут через 5 -10.

Снять показания основного ртутного термометра, пирометра и термометра сопротивления. Зафиксировать глубину погружения ртутного термометра в термостат, среднюю температуру выступающего столбика ртути основного термометра, а также температуру холодного спая термометра.

По окончании эксперимента мешалку выключить. Проволочку контактного термометра перевести в новое положение, соответствующее другой более высокой температуре, и все указанные выше операции повторить.

Необходимо провести не менее трех испытаний, повышая температуру при каждом испытании приблизительно на 5 °С.

Результаты измерений занести в табл. 1.1.

Таблица 1.1

№ п/п	Наименование величины	Размерность	Значения измеренных параметров		
			1	2	3
1	Показания основного ртутного термометра	°С			
2	Показания потенциометра	мВ			
3	Показания логометра	°С			
4	Глубина погружения ртутного термометра в термостат	°С			
5	Средняя температура выступающего столбика ртути	°С			
6	Температура холодного спая термометра	°С			
7	Показания манометрического термометра	°С			

1.9. Обработка экспериментальных данных

По показаниям ртутного термометра с учетом формул (1.3) и (1.4) определить истинную температуру воды в термостате.

При определении температуры воды по пирометру использовать кривую прибора (или переводную таблицу). Если во время испытания температура холодного спая поддерживается равной 0 °С, то температуру определять с помощью градуировочной кривой (или переводной таблицы) по показанию потенциометра. Если же во время испытания температура холодного спая поддерживалась выше 0 °С, то согласно уравнению (1.6) привести показания потенциометра к условиям градуировки, а затем уже по кривой определить температуру.

Температуру воды по термометру сопротивления определять из градуировочной кривой прибора по показаниям моста или непосредственно по логометру.

Показания манометрического термометра снимать по шкале прибора.

Определить температуру абсолютную и по шкале Фаренгейта с использованием формул (1.1) и (1.2).

Провести сравнительный анализ температуры воды в термостате, измеренной различными способами.

Лабораторная работа № 2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ИЗОЛЯЦИОННОГО МАТЕРИАЛА МЕТОДОМ ЦИЛИНДРА

2.1. Цель работы

Определить коэффициент теплопроводности изоляционного материала (асбеста, шлаковаты) и его зависимость от температуры материала.

2.2. Краткие теоретические сведения

Интенсивность переносов теплоты в твердом теле определяется температурным градиентом и значением коэффициента теплопроводности. Последний является физическим параметром: он характеризует способность материала проводить теплоту. Для различных материалов коэффициенты теплопроводности различны и зависят от структуры, массы, влажности и температуры [3].

Одним из методов определения коэффициента теплопроводности является так называемый метод цилиндра (трубы). Исследуемому материалу придается форма цилиндрического слоя, его помещают на поверхность круглой трубы, которая изнутри равномерно прогревается. При установившемся

тепловом режиме системы все количество теплоты, выделяющееся внутри трубы, проходит через слой материала и определяется следующим уравнением:

$$Q = \frac{2\pi\lambda l \cdot (t_{w1} - t_{w2})}{\ln \frac{d_2}{d_1}} \quad (2.1)$$

где λ - коэффициент теплопроводности исследуемого теплоизоляционного материала, Вт/(м·град); l - длина трубы, м; d_1 и d_2 - соответственно внутренний и наружный диаметры цилиндрического слоя материала, м; t_{w1} , t_{w2} - соответственно средняя температура внутренней и внешней поверхностей теплоизоляционного слоя, °С.

Если измерить l , d_1 , d_2 , t_{w1} , t_{w2} , Q , то из уравнения (2.1) можно определить значение коэффициента теплопроводности, Вт/(м·град).

При качественно выполненном эксперименте и высокой точности измерительных приборов относительная погрешность в определении λ не превышает 3...5%.

Еще одним достоинством данного метода является то, что экспериментально можно определить коэффициент теплопроводности сложной теплоизоляционной конструкции, состоящей из нескольких слоев, что чаще всего встречается на практике.

2.3. Принципиальная конструктивная схема экспериментальной установки

Установка (рис. 2.1) состоит из трубы 1 диаметром 38 мм и длиной 1 м. Внутри трубы находится электронагреватель 2, создающий тепловой поток. Мощность нагревателя регулируется автотрансформатором 5, а измеряется ваттметром 4. Для уменьшения потерь теплоты торцы трубы изолируются. Испытуемый материал (асбест, шлаковата, стекловата) наносится на трубу и принимает форму полого цилиндра внутренним диаметром $d_1 = 38$ мм и наружным $d_2 = 44$ мм. Температура испытуемого материала измеряется термопарами, установленными на внутренней и наружной поверхности теплоизоляционного слоя, как показано на схеме (рис. 2.1). Одна из термопар выведена на самопишущий потенциометр с целью наблюдения выхода работы установки на стационарный тепловой режим. Остальные термопары выведены через переключатель 6 на потенциометр 7 с общим холодным спаем, помещенным в сосуд Дьюара 8 (при отсутствии тающего льда холодный спай термопар может находиться на открытом воздухе при температуре окружающей среды помещения).

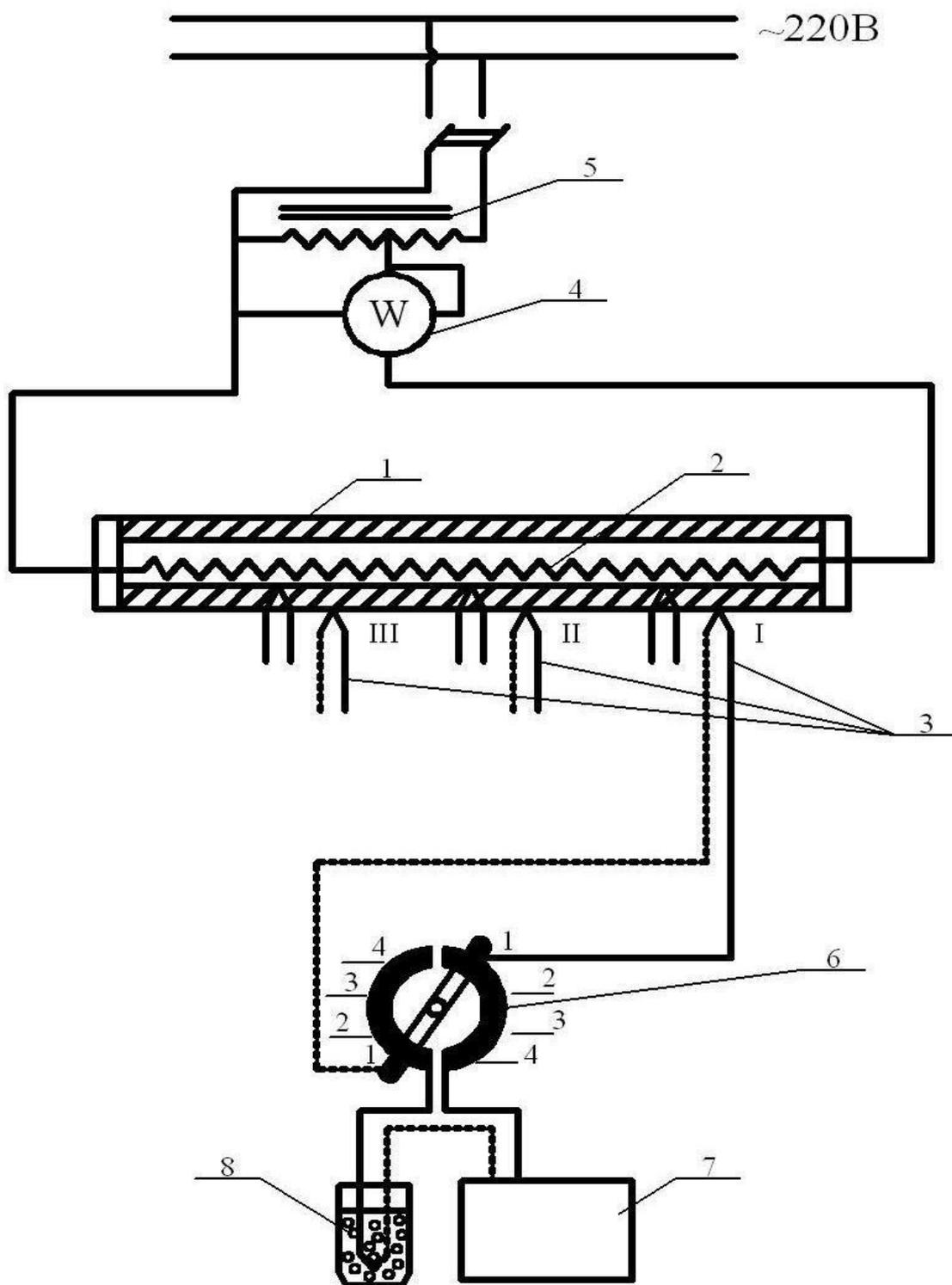


Рис. 2.1. Схема экспериментальной установки:

1 – труба с изоляцией; 2 – электронагреватель; 3 – термопары; 4 – ваттметр;
 5 – автотрансформатор; 6 – переключатель; 7 – потенциометр; 8 – сосуд Дьюара

2.4. Порядок проведения экспериментальных исследований

Проверить схему включения установки в сеть и подключение измерительных приборов. Прогрев установки требует длительного времени (2-3 часа), поэтому установка включается заранее. Испытание проводится только при установившемся тепловом режиме, о чем судят по показаниям самопишущего потенциометра. Когда запись будет представлять собой прямую линию, о чем свидетельствует постоянство температуры, следует провести измерение всех величин 3 раза через три минуты.

Следующие испытания проводить при другом температурном режиме. Для этого по указанию преподавателя следует изменить силу тока, питающего нагреватель, дождаться установившегося температурного режима и снять показания приборов.

2.5. Обработка экспериментальных данных

Коэффициент теплопроводности исследуемого материала вычисляется по уравнению теплопроводности для цилиндрической стенки:

$$\lambda = \frac{Q \ln \frac{d_2}{d_1}}{2\pi l (t_{w1} - t_{w2})}, \quad (2.2)$$

где d_1 и d_2 - соответственно внутренний и внешний диаметры испытуемого слоя изоляции, м; l - длина испытуемого слоя, м; t_{w1} - температура внутреннего слоя, определяемая как средняя из показаний термопар, °С; t_{w2} - температура наружного слоя, определяемая как средняя по показаниям термопар, °С.

Количество теплоты определяется по расходу электроэнергии и численно равно мощности электронагревателя, Вт:

$$Q = W \quad (2.3)$$

Полученное в уравнении (2.2) значение коэффициента теплопроводности следует отнести к средней температуре исследуемого материала:

$$t_{cp} = \frac{t_{w1} + t_{w2}}{2} \quad (2.4)$$

Определить несколько значений коэффициента при разных температурах и построить график зависимости коэффициента теплопроводности от средней температуры исследуемого материала $\lambda = f(t)$.

Полученные результаты занести в табл. 2.1, сравнить с имеющимися данными [3] и подсчитать относительную ошибку.

Таблица 2.1

Номер опыта	Время	Показания термопар, мВ						Мощность, Вт	Размеры трубы, м		
		1	2	3	4	5	6		d_1	d_2	l
1											
2											
3											

Лабораторная работа № 3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОТДАЧИ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ТРУБЫ ПРИ ЕСТЕСТВЕННОЙ КОНВЕКЦИИ

3.1. Цель работы

Определить коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности горизонтальной трубы к окружающей среде.

3.2. Краткие теоретические сведения

Коэффициент теплоотдачи горизонтальной трубы при естественной конвекции определяется по формуле Ньютона [3]:

$$Q_k = \alpha F_n (t_{cm} - t_{\epsilon}) \quad (3.1)$$

где Q_k - количество теплоты, отданное при конвективном теплообмене наружной поверхностью трубы воздуху, определяется как разность между полным количеством теплоты $Q_{пол}$ и количеством теплоты, отданным лучеиспусканием Q_l , Вт, по формуле

$$Q_k = Q_{пол} - Q_l \quad (3.2)$$

Полное количество теплоты определяется по расходу электроэнергии:

$$Q_{пол} = IU \quad (3.3)$$

где I - сила тока в нагревателе, А; U - напряжение в сети, В.

Это значение численно равно мощности электронагревателя, расположенного внутри трубы.

Количество теплоты, отданное трубой лучеиспусканием, определяется по формуле

$$Q_l = \epsilon C_0 F \left[\left(\frac{T_{cm}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\epsilon}}{100} \right)^4 \right] \quad (3.4)$$

где C_0 - коэффициент излучения абсолютно чёрного тела, равный $5,7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$; ε - степень черноты поверхности трубы, зависящая от материала трубы и состояния ее поверхности.

При известных значениях $Q_{л}$, t_{cm} , t_6 определяется экспериментальное значение коэффициента α .

Расчетное значение коэффициента α_p определяется по формуле

$$\alpha_p = \frac{Nu_6 \cdot \lambda_6}{d_n} \quad (3.5)$$

где d_n - наружный диаметр трубы, м; λ_6 - коэффициент теплопроводности среды, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{град})$; Nu_6 - число Нуссельта, определяемое при параметрах воздуха.

Число Нуссельта вычисляется из критериального уравнения для естественной конвекции горизонтальной трубы:

$$Nu_B = 0,5 \cdot (Gr_B \cdot Pr_B)^{0,25} \quad (3.6)$$

В данной формуле присутствуют критерий Прандтля Pr , являющийся физическим параметром среды и критерий Грасгофа Gr , определяемый по формуле

$$Gr_B = g \cdot \beta \cdot \Delta t \frac{d_n^3}{\nu_B^2} \quad (3.7)$$

где $\beta = 1/T_B$ - температурный коэффициент объемного расширения воздуха, $1/\text{К}$; $\Delta t = t_{cm} - t_6$ - температурный напор, $^{\circ}\text{C}$; ν_6 - кинематический коэффициент вязкости среды, принимаемый по таблице «Физические свойства среды» или приложению данных методических указаний.

Значения λ_6 , ν_6 , Pr_6 определяются по табл. П.1 приложения при температуре среды.

3.3. Принципиальная конструктивная схема экспериментальной установки

Установка (рис. 3.1) для определения коэффициента теплоотдачи α состоит из горизонтальной трубы 1, электронагревателя (ЭН) 2, латра 3 регулирования мощности ЭН. Система измерений включает медно-константановые термопары 4 для измерения температур в четырех точках поверхности трубы, ваттметр 5 для измерения теплового потока от ЭН, вольтметр 6, потенциометр 7, переключатель термопар 8 и термометр 9. Холодный спай термопар помещается в сосуд с тающим льдом (при отсутствии тающего льда холодный спай термопар может находиться на открытом воздухе при температуре помещения).

3.4. Порядок проведения экспериментальных исследований

Подключить установку к сети и установить необходимую мощность ЭН; по истечении 20 - 30 мин, когда значение температур t_{cm} во времени не будут

меняться, снять показания ваттметра, потенциометра по 4 термопарам, термометра, измеряющего температуру воздуха на расстоянии от трубы. С интервалом в 3 минуты испытания повторить 3 раза.

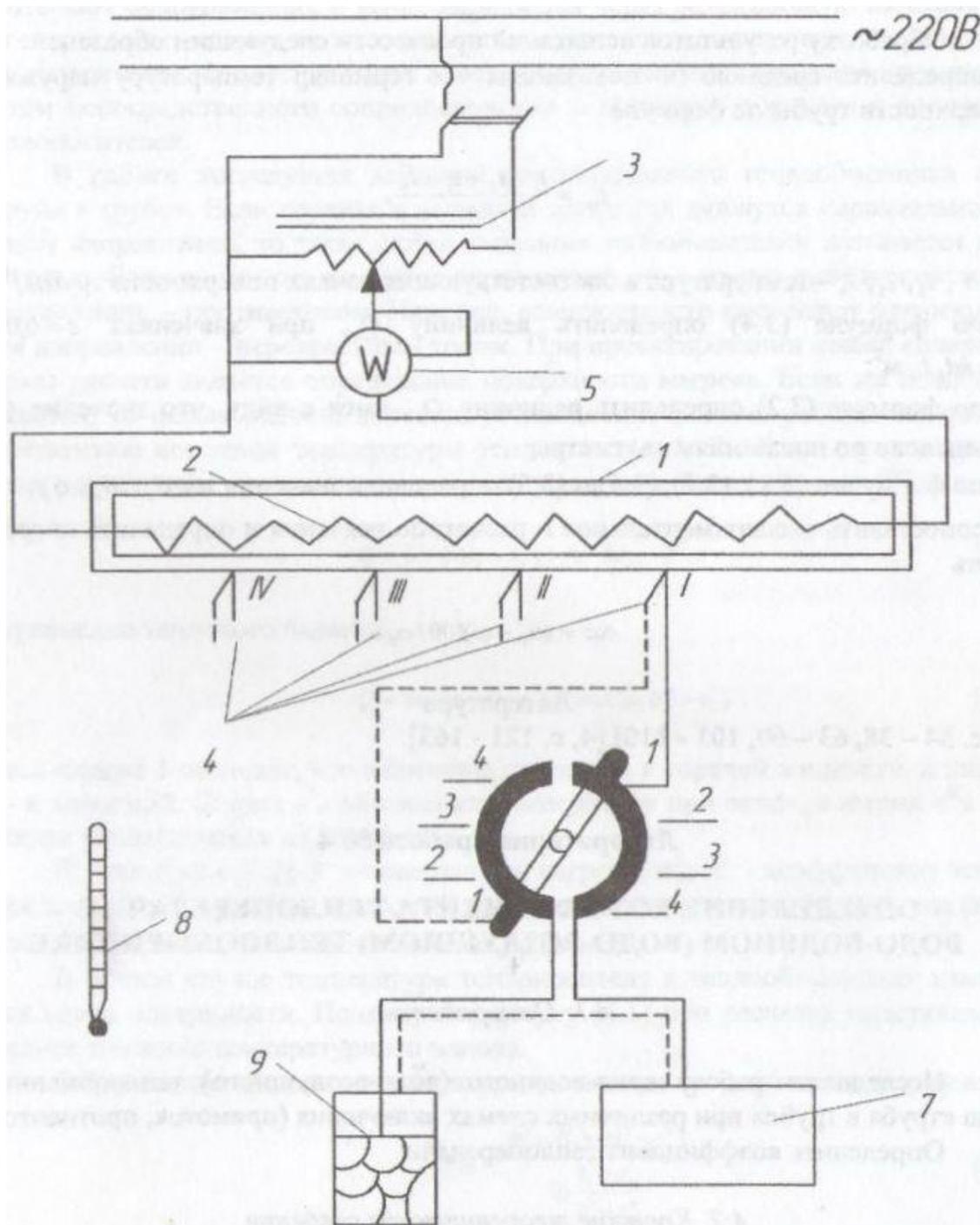


Рис. 3.1. Схема экспериментальной установки:

1 – труба; 2 – электронагреватель; 3 – латра регулирования мощности электронагревателя; 4 – медь-константановые термопары; 5 – ваттметр; 6 – вольтметр; 7 – потенциометр; 8 - термометр; 9 – сосуд Дьюара

Результаты измерений записать в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Номер опыта	Время	Мощность ЭН, Вт	Температура стенки, °С				t_{cm}	t_e
			t_1	t_2	t_3	t_4		
1								
2								
3								

3.5. Обработка экспериментальных данных

Обработку результатов испытаний произвести следующим образом:

- определить среднюю по показаниям четырех термопар температуру наружной поверхности трубы по формуле

$$t_{CT} = \frac{t_1 + t_2 + t_3 + t_4}{4} \quad (3.8)$$

где t_1, t_2, t_3, t_4 – температура в соответствующих точках поверхности трубы, °С;

- по формуле (3.4) определить величину Q_n , при значениях $\varepsilon = 0,053$;
- определить площадь поверхности теплоотдачи по формуле $F = \pi d_n l$, м²;
- по формуле (3.2) определить величину Q_k , имея в виду, что значение $Q_{пол}$ определено по показаниям ваттметра;
- по формулам (3.1), (3.7), (3.6) и (3.5) определить значения α, Gr, Nu, α_p ;
- сопоставить экспериментальное и расчетное значения и определить погрешность

$$\Delta\alpha = |(\alpha_p - \alpha) \cdot 100 / \alpha_p| \quad (3.9)$$

Лабораторная работа № 4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ В ВОДО-ВОДЯНОМ (ВОДО-ВОЗДУШНОМ) ТЕПЛООБМЕННИКЕ

4.1. Цель работы

Исследовать работу водо-водяного (водо-воздушного) теплообменника типа «труба в трубе» при различных схемах включения (прямоток, противоток). Определить коэффициент теплопередачи.

4.2. Краткие теоретические сведения

Устройство, служащее для передачи тепла от одного теплоносителя к другому, называется теплообменным аппаратом или теплообменником. По

принципу действия теплообменные аппараты разделяются на рекуперативные, регенеративные и смешительные.

В рекуперативных теплообменниках горячий и холодный теплоносители протекают одновременно, и тепло передается через разделяющую их стенку. В регенеративных одна и та же поверхность омывается то горячим, то холодным теплоносителем. В смешительных аппаратах процесс теплопередачи происходит путём непосредственного соприкосновения и смешения горячего и холодного теплоносителей.

В работе исследуется действие рекуперативного теплообменника типа «труба в трубе». Если горячий и холодный потоки движутся параллельно и в одном направлении, то такая схема движения теплоносителей называется прямотоком. Если потоки движутся параллельно, но в прямо противоположном направлении, - протокоток. Если потоки протекают в перекрестном направлении – перекрестным током.

При проектировании новых теплообменных аппаратов целью расчета является определение площади поверхности нагрева. Если же последнее известно, то целью расчета является установление режима работы аппарата и определение конечной температуры теплоносителей. В обоих случаях основными расчетными уравнениями являются уравнение теплопередачи [3]

$$Q = k \cdot F \cdot \Delta t_{cp} = k \cdot F \cdot (t_1 - t_2) \quad (4.1)$$

и уравнение теплового баланса

$$Q = m_1 C_{p1} (t_1' - t_1'') = m_2 C_{p2} (t_2'' - t_2') \quad (4.2)$$

где нижний индекс 1 означает, что величины относятся к горячей среде, а индекс 2 – к холодной. Штрих «'» обозначает температуру при входе, а штрих «''» - на выходе теплоносителя из аппарата.

F – поверхность нагрева, м²; k – коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·град); m – массовый расход теплоносителя, кг/ч; C_p – массовая изобарная теплоемкость теплоносителя, кДж/(кг·град); t – температура теплоносителей, °С.

В общем случае температура теплоносителя в теплообменниках изменяется вдоль поверхности. Поэтому в формулу (4.1) при расчетах подставляется среднее значение температурного напора.

Определение среднего температурного напора производится по формуле

$$\Delta t_{cp} = \frac{(t_1' - t_2') - (t_1'' - t_2'')}{\ln \frac{t_1' - t_2'}{t_1'' - t_2''}} \quad (4.3)$$

В тех случаях, когда $\frac{\Delta t''}{\Delta t'} = 0,8$ т.е. температура рабочих жидкостей вдоль поверхности нагрева изменяется незначительно, средний температурный напор можно вычислить как среднеарифметический из крайних напоров:

$$\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t' + \Delta t''}{2} \quad (4.4)$$

При расчете теплообменных аппаратов большие трудности возникают с определением коэффициента теплопередачи K , который является количественной характеристикой процесса теплопередачи и численно равен количеству теплоты, переданной в час от одного теплоносителя другому через поверхность в 1 м^2 при разности температур между ними в 1 градус.

Для плоской однослойной стенки коэффициент теплопередачи определяется по формуле

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (4.5)$$

где α_1 - коэффициент теплопередачи от греющей среды к стенке, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град})$; α_2 - коэффициент теплоотдачи от стенки к нагреваемой среде, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град})$; δ - толщина стенки, м; λ - коэффициент теплопроводности стенки, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{град})$.

В случае отсутствия холодной воды исследования можно проводить с использованием воздуха и при расчете использовать объемную изобарную теплоемкость C'_{pm} .

4.3. Принципиальная конструктивная схема экспериментальной установки

Экспериментальная установка (рис. 4.1) представляет собой водо-водяной (водо-воздушный) теплообменник «труба в трубе» 1. По внутренней трубе течет горячая вода, которая нагревается в термостате 2. Холодная вода (воздух) из водопровода подается в пространство между внутренней и внешней трубой и, нагреваясь, сливается в канализацию.

Коэффициент теплопередачи определяется из основного уравнения теплопередачи

$$k = \frac{Q}{F \cdot \Delta t_{cp}} \quad (4.6)$$

Тепловой поток определяется из уравнения теплового баланса

$$Q = m_2 C_{p2} (t_2'' - t_2') \quad (4.7)$$

Для этого измеряем массовый расход холодной воды с помощью водомера 3. Температуры горячей и холодной воды на входе в теплообменник и на выходе из него измеряются ртутными термометрами 4.

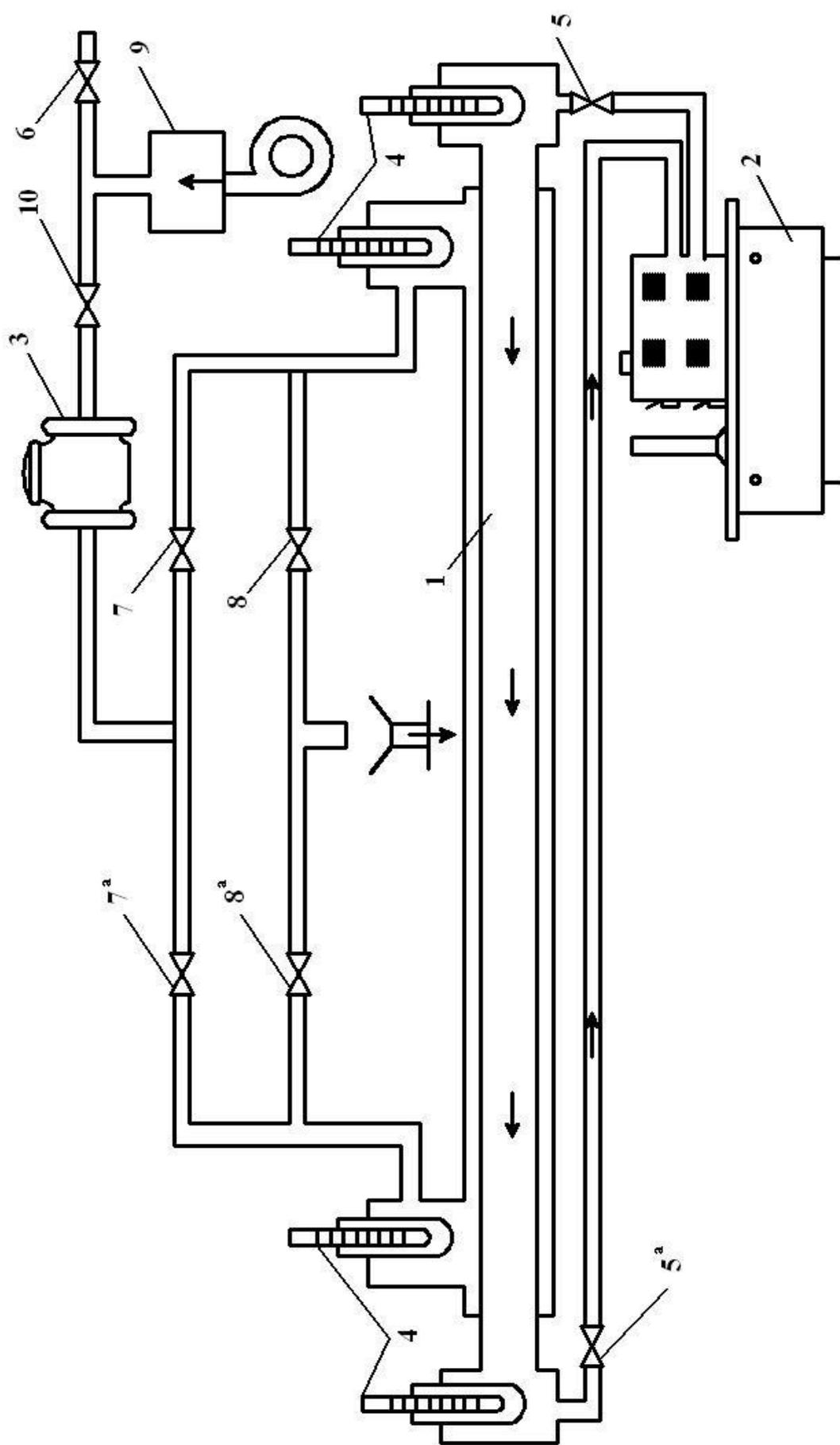


Рис. 4.1. Схема экспериментальной установки:
 1-теплообменник типа "труба в трубе"; 2-термостат; 3-водомер; 4-термометры;
 5,5а,8,8а-вентили; 6,7,7а-краны; 9-насос; 10-задвижка

4.4. Порядок проведения экспериментальных исследований

Испытания по схеме «прямоток» проводить при температуре горячей воды в термостате 70...90 в следующей последовательности:

- открыть вентили 5 и 5а, включить насос термостата, открыть кран 7 и вентиль 8а, закрыть кран 7а и вентиль 8;
- открыть кран 6 и отрегулировать расход холодной воды – 100 кг/ч, наблюдая за показаниями водомера;
- убедившись в пространстве температур по всем термометрам, снимать показания всех приборов в течение 15 минут с интервалом в 3 минуты;
- провести испытание при включении теплообменника по схеме «противоток». Для этого закрыть кран 7 и вентиль 8а, открыть кран 7а и вентиль 8 и открыть кран 6, регулируя расход холодной воды (воздуха);
- по окончании работ отключить подачу горячей и холодной воды (воздуха), выключить термостат.

4.5. Обработка экспериментальных данных

Сняв показания водомера и определив время испытания, определить массовый расход холодной воды, кг/с.

Найти средние значения температур теплоносителей, °С.

Определить тепловой поток по уравнению (4.7), Вт.

По внешнему диаметру внутренней трубы определить поверхность нагрева, м².

Подсчитать температурный напор Δt_{cp} по уравнениям (4.3) или (4.4) для режимов прямотока и противотока.

Определить коэффициент теплопередачи K из уравнений (4.1) или (4.6).

Результаты исследований занести в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Номер опыта	Время проведения опыта	t'_1	t''_1	t'_2	t''_2	Показания водомера	$d_{в}, м$	$l, м$	Примечание
Прямоток									
1.									
2.									
Сред.									
Противоток									
1.									
2.									
Сред.									

Лабораторная работа № 5

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТЕПЕНИ ЧЕРНОТЫ ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛА МЕТОДОМ СРАВНЕНИЯ

5.1. Цель работы

Определить степень черноты шероховатого и окисленного алюминия.

5.2. Краткие теоретические сведения

Одной из особенностей лучистого теплообмена является то, что он сопровождается двойным преобразованием энергии. Один раз это преобразование происходит, когда тело испускает лучи во внешнее пространство. При этом теплота, теряемая телом, превращается в лучистую энергию. Второе преобразование происходит, когда лучи достигают тела и лучистая энергия снова переходит в теплоту, воспринимаемую этим телом.

Тепловое излучение – результат внутриатомных процессов, обусловленных влиянием температуры.

Лучистая энергия представляет собой энергию электромагнитных колебаний, распространяющихся прямолинейно в окружающем пространстве со скоростью света. За единицу измерения лучистой энергии принимается ватт.

Тепловое излучение (поглощение) различных тел определяется их тепловым состоянием, а также природными свойствами. Тела, способные поглощать полностью тепловые лучи и обладающие максимальной способностью к излучению, называются абсолютно черными. Таких тел в природе не существует, и все реальные тела излучают при одной и той же температуре только часть энергии абсолютно черного тела.

Согласно закону Стефана-Больцмана, количество энергии, излучаемой нагретым телом, пропорционально четвертой степени абсолютной температуры [3]:

$$E = \varepsilon \cdot E_n = \varepsilon \cdot C_0 \cdot \left(\frac{T}{100}\right)^4 = \varepsilon \cdot 5,7 \cdot \left(\frac{T}{100}\right)^4 \quad (5.1)$$

где C_0 - коэффициент излучения (для абсолютно черного тела $C_0 = 5,7 \text{ Вт/м}^2$); ε - степень черноты тела, характеризует излучение серого тела E по отношению к излучению абсолютно черного тела E_0

$$\varepsilon = \frac{E}{E_0} = \frac{C \cdot \left(\frac{T}{100}\right)^4}{C_0 \cdot \left(\frac{T}{100}\right)^4} = \frac{C}{C_0} \quad (5.2)$$

Степень черноты является важным параметром, который широко используется в расчетах лучистого теплообмена.

5.3. Принципиальная конструктивная схема экспериментальной установки

На рис. 5.1 представлена схема установки. Она состоит из двух алюминиевых труб 1 и 2 длиной 50 мм и $d_n = 36,5$ мм. Внутри каждой расположен электронагреватель 3, в цепь которого включен ваттметр 5. Мощность нагревателей измеряется ваттметром и может регулироваться автотрансформатором 4. Одна из труб (черная 2), покрытая бакелитовым лаком, считается эталонной, так как степень черноты лака ε_0 известна и равна 0,87. Испытываемая труба 1 алюминиевая с окисленной шероховатой поверхностью характеризуется степенью черноты ε .

Для измерения температуры на поверхностях труб предусмотрены термопары 6, которые через переключатель 7 присоединены к потенциометру 8. Общий холодный спай находится в сосуде Дьюара 9.

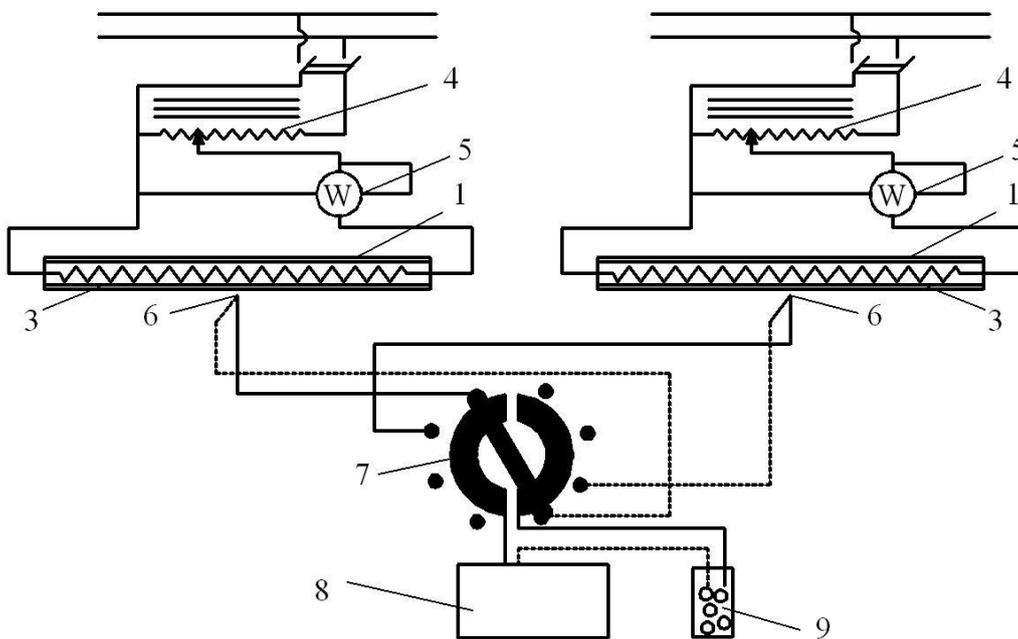


Рис. 5.1. Схема экспериментальной установки:

- 1 – испытываемая труба; 2 – черная труба; 3 – электронагреватель;
4 - автотрансформатор; 5 – ваттметр; 6 – термопары; 7 – переключатель;
8 - потенциометр; 9 – сосуд Дьюара

Для определения степени черноты поверхности металлической трубы используется метод сравнения, основанный на измерении количества теплоты, отдаваемого стенками испытываемой и эталонной трубы.

Количество теплоты, отданное трубами окружающей среде, состоит из тепла, переданного конвекцией Q_k , и тепла, переданного излучением Q_l . Обе трубы имеют одинаковые геометрические размеры, одинаково расположены, и

температуры их стенок во время опыта поддерживаются одинаковыми, поэтому одинаково для обеих трубок будет и количество теплоты, передаваемого конвекцией

$$Q_{k1} = Q_{k2} \quad (5.3)$$

Количество теплоты, отданное лучеиспусканием каждой трубкой окружающему воздуху, определяется по формулам

$$Q_{\lambda 1} = 5,7 \cdot \varepsilon_1 \cdot F \cdot \left[\left(\frac{T_{cm}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\varepsilon}}{100} \right)^4 \right] \quad (5.4)$$

$$Q_{\lambda 2} = 5,7 \cdot \varepsilon_2 \cdot F \cdot \left[\left(\frac{T_{cm}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\varepsilon}}{100} \right)^4 \right] \quad (5.5)$$

Разность в количествах теплоты, отданного первой и второй трубами, будет зависеть от разной их способности к излучению, т.е. от степени черноты испытуемой трубки:

$$\Delta Q = Q_{\lambda 2} - Q_{\lambda 1} = 5,7(\varepsilon_2 - \varepsilon_1) \cdot F \cdot \left[\left(\frac{T_{cm}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\varepsilon}}{100} \right)^4 \right] \quad (5.6)$$

В процессе эксперимента ΔQ находится по разности показаний ваттметров.

Из формул (5.4) и (5.5) следует, что степень черноты испытуемого металла

$$\varepsilon_1 = 0,87 - 0,176 \cdot \frac{W_2 - W_1}{F \cdot \left[\left(\frac{T_{cm}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\varepsilon}}{100} \right)^4 \right]} \quad (5.7)$$

5.4 Порядок проведения экспериментальных исследований

Испытания проводить на прогретой установке (с использованием переключателя и потенциометра) в следующем порядке:

- проверить температуру поверхности обеих трубок. Расхождение температур между эталонной и испытуемой трубкой не должно превышать 0,5 - 1,0 °С;
- при значительной разнице температур отрегулировать мощность нагревателя испытуемой трубки;
- записать показания приборов в табл. 5.1 с интервалом в 3 мин;
- при стационарном режиме (постоянстве и равенстве температур обеих термодпар) отметить время и начать эксперимент, в процессе которого проводить снятие показаний приборов через каждые 2 мин. в течение 20 минут.

Экспериментальные данные усреднить и по формуле (5.2) определить степень черноты алюминиевой трубки.

Таблица 5.1

Время	Испытуемая труба 1			Эталонная труба 2			Температура воздуха	
	$W_1, \text{Вт}$	$E_1, \text{мВ}$	$t_1, ^\circ\text{C}$	$W_2, \text{Вт}$	$E_2, \text{мВ}$	$t_2, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{в}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{в}}, \text{К}$

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дерюгин, В. В. Тепломассообмен [Электронный ресурс]: учебное пособие / В. В. Дерюгин, В. Ф. Васильев, В. М. Уляшева. - Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, ЭБС АСВ, 2016. - 244 с. - ISBN 978-5-9227-0690-2. URL: <http://www.iprbookshop.ru/74378.html>
2. Горбачев, М. В. Тепломассообмен [Электронный ресурс]: учебное пособие / М. В. Горбачев. - Тепломассообмен ; 2025-02-05. - Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2015. - 443 с. - Гарантированный срок размещения в ЭБС до 05.02.2025 (автопродлонгация). - ISBN 978-5-7782-2803-0. URL: <http://www.iprbookshop.ru/91625.html>
3. Лаптев, А. Г. Основы расчета и модернизация тепломассообменных установок в нефтехимии [Электронный ресурс] : монография / А. Г. Лаптев, М. И. Фарахов, Н. Г. Минеев. - Основы расчета и модернизация тепломассообменных установок в нефтехимии; 2024-12-16.-Санкт-Петербург: Страта, 2015. - 576 с. - Гарантированный срок размещения в ЭБС до 16.12.2024 (автопродлонгация). - ISBN 978-5-906150-38-7. URL: <http://www.iprbookshop.ru/89904.html>
4. Михеев, М. А. Основы теплопередачи / М. А. Михеев, И. М. Михеева. - М.: Энергия, 1977. - 344 с.

НЕКОТОРЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВОЗДУХА

Таблица II
Физические свойства сухого воздуха ($B = 760$ мм рт. ст.)

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho,$ кг/м ³	$C_p,$ кДж/ (кг·град)	$\lambda \cdot 10^2,$ Вт/ (м·град)	$a \cdot 10^6,$ м ² /с	$\mu \cdot 10^6,$ (Н·с)/м ²	$\nu \cdot 10^6,$ м ² /с	Pr
-50	1,584	1,013	2,04	12,7	14,6	9,23	0,728
-40	1,515	1,013	2,12	13,8	15,2	10,04	0,728
-30	1,453	1,013	2,20	14,9	15,7	10,80	0,723
-20	1,395	1,009	2,28	16,2	16,2	11,61	0,716
-10	1,342	1,009	2,36	17,4	16,7	12,43	0,712
0	1,293	1,005	2,44	18,8	17,2	13,28	0,707
10	1,247	1,005	2,51	20,0	17,6	14,16	0,705
20	1,205	1,005	2,59	21,4	18,1	15,06	0,703
30	1,165	1,005	2,67	22,9	18,6	16,00	0,701
40	1,128	1,005	2,76	24,3	19,1	16,96	0,699
50	1,093	1,005	2,83	25,7	19,6	17,95	0,698
60	1,060	1,005	2,90	27,2	20,1	18,97	0,696
70	1,029	1,009	2,96	28,6	20,6	20,02	0,694
80	1,000	1,009	3,05	30,2	21,1	21,09	0,692
90	0,972	1,009	3,13	31,9	21,5	22,10	0,690
100	0,946	1,009	3,21	33,6	21,9	23,13	0,688
120	0,898	1,009	3,34	36,8	22,8	25,45	0,686
140	0,854	1,013	3,49	40,3	23,7	27,80	0,684
160	0,815	1,017	3,64	43,9	24,5	30,09	0,682
180	0,779	1,022	3,78	47,5	25,3	32,49	0,681
200	0,746	1,026	3,93	51,4	26,0	34,85	0,680
250	0,674	1,038	4,27	61,0	27,4	40,61	0,677
300	0,615	1,047	4,60	71,6	29,7	48,33	0,674
350	0,566	1,059	4,91	81,9	31,4	55,46	0,676
400	0,524	1,068	5,21	93,1	33,0	63,09	0,678
500	0,456	1,093	5,74	115,3	36,2	79,38	0,687
600	0,404	1,114	6,22	138,3	39,1	96,89	0,699
700	0,362	1,135	6,71	163,4	41,8	115,4	0,706
800	0,329	1,156	7,18	188,8	44,3	134,8	0,713
900	0,301	1,172	7,63	216,2	46,7	155,1	0,717
1000	0,277	1,185	8,07	245,9	49,0	177,1	0,719
1100	0,257	1,197	8,50	276,2	51,2	199,3	0,722

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

*к выполнению лабораторных работ по дисциплинам «Тепломассообмен»,
«Теплогазоснабжение с основами теплотехники», «Техническая
термодинамика и теплотехника» для студентов направлений
08.03.01 «Строительство», 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»,
21.03.01 «Нефтегазовое дело», 18.03.01 «Химическая технология»
всех форм обучения*

Составители:

Мелькумов Виктор Нарбенович
Петрикеева Наталья Александровна
Колосов Александр Иванович
Чудинов Дмитрий Михайлович

В авторской редакции

Подписано в печать 01.06.2021.

Формат 60x84 1/16. Бумага для множительных аппаратов.

Уч.-изд. л. 1,8. Усл. печ. л. 1,7. Тираж 188 экз.

Заказ № 82

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»
394026 Воронеж, Московский просп., 14

Участок оперативной полиграфии издательства ВГТУ
394026 Воронеж, Московский просп., 14