

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«Национальный исследовательский технологический университет
«МИСИС»
НОВОТРОИЦКИЙ ФИЛИАЛ**

Кафедра электроэнергетики и электротехники

А.Н. Бушуев

ТЕПЛОТЕХНИКА

Лабораторный практикум
для студентов направления подготовки
18.03.01 Химическая технология,
всех форм обучения

Новотроицк, 2023

УДК 621.1.016

ББК 31.31

Б 94

Рецензенты:

*Доцент кафедры металлургических технологий и оборудования
Новотроицкого филиала ФГАОУ ВО НИТУ «МИСИС», к.т.н.,
Д.Р. Ганин*

*Заведующий кафедрой машиностроения, энергетики и транспорта
Орского гуманитарно-технологического института (филиал) ФГБОУ ВО
«Оренбургский государственный университет», к.т.н.
Н.В. Фирсова*

Бушуев А.Н. Теплотехника: лабораторный практикум для студентов направления подготовки 18.03.01 Химическая технология, всех форм обучения. – Новотроицк: НФ НИТУ «МИСИС», 2023. – 59 с.

Методические указания по выполнению лабораторных работ по дисциплине «Теплотехника» предназначены для практического закрепления теоретических знаний студентами на начальном этапе обучения по направлению подготовки 18.03.01 Химическая технология.

Указания составлены в соответствии с требованиями ФГОС и ОС НИТУ «МИСИС» для бакалавров, обучающихся по направлению подготовки 18.03.01 Химическая технология.

Рекомендовано Методическим советом НФ НИТУ «МИСИС»

© ФГАОУ ВО «Национальный
исследовательский технологический
университет «МИСИС»,
Новотроицкий филиал, 2023.

Содержание

Введение.....	4
Лабораторная работа № 1	
Исследование изохорного процесса	5
Лабораторная работа № 2	
Свободная и вынужденная конвекция для горизонтальной трубы	10
Лабораторная работа № 3	
Определение коэффициента теплопроводности твердых тел методом трубы.	20
Лабораторная работа № 4	
Исследование процессов изменения параметров влажного воздуха	24
Лабораторная работа № 5	
Исследование теплопередачи в рекуперативном теплообменном аппарате....	38
Лабораторная работа № 6 (дополнительно)	
Определение теплопроводности материалов методом пластины	44
Приложение А. Физические параметры воздуха	51
Приложение Б. Психрометрическая таблица воздуха	53
Приложение В. Степень черноты нормального излучения для различных материалов	54
Приложение Г. Коэффициент теплопроводности различных материалов.....	55
Список рекомендуемой литературы	58

Введение

Теплотехника - наука, изучающая теорию и средства превращения энергии природных источников в тепловую механическую и электрическую энергии, а также использования тепла для практических целей. Теоретические основы теплотехники включают термодинамику и теорию тепломассообмена. Основным методом теплотехники является термодинамический метод. Сущность его состоит в том, что на основе изучения энергоэнтروпийных балансов в макроскопических системах устанавливают условие максимальной эффективности тепловых машин и установок. Затем определяют пути приближения к этим условиям.

Цель настоящего лабораторного практикума – научить студентов технически грамотно осуществлять тепловой расчет оборудования и термодинамических процессов, протекающих в реальных и идеализированных условиях.

Каждая лабораторная работа имеет следующую структуру: назначение, задание, описание опытной установки, порядок выполнения работы и обработка опытных данных, требования к отчету, вопросы для самоконтроля. Все работы относятся к определенному разделу учебного курса. Поэтому студентам необходимо детально ознакомиться со всеми вопросами, относящимися к выполняемой работе, по учебникам и методическим указаниям. Затем следует подробно изучить лабораторную установку, на которой предстоит выполнить задание, используемую измерительную аппаратуру и порядок выполнения работы.

Защита лабораторных работ проводится устно, для этого студент должен иметь отчет о проведенной работе. Отчет должен содержать:

- название и цель работы;
- теоретические сведения;
- схемы и графики при их наличии
- результаты наблюдения и необходимые расчеты;
- выводы.

Все лабораторные работы выполняются с использованием специализированного программного обеспечения, моделирующего теплотехнические процессы и оборудование, Microsoft Office Word, Microsoft Office Excel. Также студентам представляется выбор выполнения между лабораторными работами №4 и №6, либо работа №6 может выполняться дополнительно для закрепления теоретических материалов по изучаемой дисциплине.

Данный лабораторный практикум раскрывает компетенции, необходимые по учебному плану дисциплины.

Лабораторная работа № 1

Исследование изохорного процесса

Цель работы: Исследование процессов идеальных газов на примере изохорного процесса воздуха.

Задачи работы: Провести экспериментальное исследование зависимости давления воздуха от температуры при постоянном объёме воздуха в колбе и построить графическую зависимость давления от температуры, определить изменение энтропии воздуха в процессе, считая теплоемкость постоянной.

1 Теоретическое введение

Термодинамический процесс, в котором удельный объем газа не изменяется, называется изохорным. Линия, изображающая этот процесс в какой-либо системе координат, называется изохорой.

На рисунке 1.1 показаны графики процесса в координатах $p-v$ и $p-T$. Из уравнения состояния идеального газа следует, что при $v=\text{const}$:

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}, \quad (1.1)$$

т. е. давление газа прямо пропорционально его температуре (закон Шарля).

Работа расширения газа в изохорном процессе равна нулю, т.к. $dv = 0$:

$$l = \int_{v_1}^{v_2} p dv = 0. \quad (1.2)$$

Следовательно, вся подводимая к газу теплота расходуется полностью на изменение удельной внутренней энергии газа $dq = du = c_v dT$, откуда:

$$\Delta u = \int_{T_1}^{T_2} c_v dT. \quad (1.3)$$

В приведенных выражениях индексы 1 и 2 относятся, соответственно, к начальной и конечной точкам процесса. При постоянной теплоемкости c_v (независящей от температуры), кДж/кг:

$$\Delta u = u_2 - u_1 = c_v (T_2 - T_1). \quad (1.4)$$

При переменной теплоемкости c_v (с учетом зависимости от температуры):

$$\Delta u = u_2 - u_1 = c_v \Big|_0^{t_2} \cdot t_2 - c_v \Big|_0^{t_1} \cdot t_1. \quad (1.5)$$

Значения теплоёмкостей принимаются по Приложению А в зависимости от температур t_1 и t_2 . Изменение энтропии в обратимом изохорном процессе (при постоянной теплоемкости) определяется по уравнению, кДж/(кг·К):

$$\Delta s = s_2 - s_1 = c_v \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right). \quad (1.6)$$

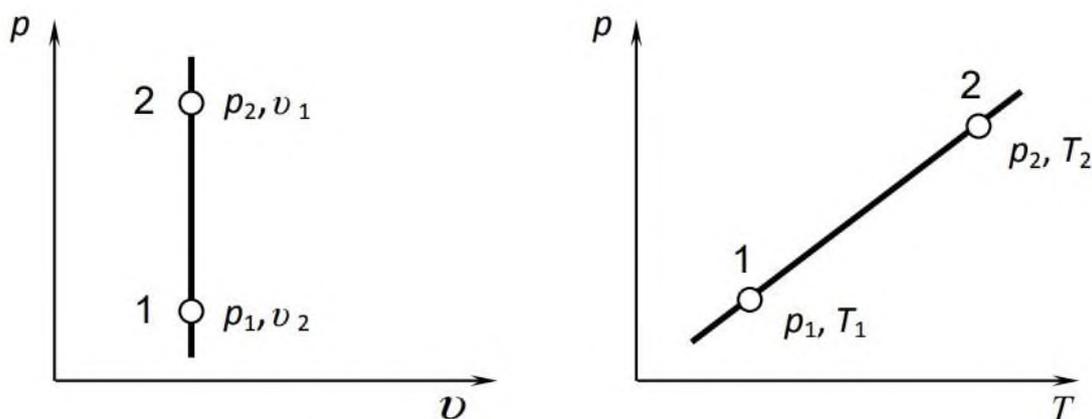


Рисунок 1.1 - Графики изохорного процесса

2 Выполнение работы

Лабораторная работа выполняется виртуально посредством мысленного подбора требуемых значений под руководством преподавателя. Значения должны подбираться не хаотично случайно, а опираясь на теорию термодинамики. На основании подбираемых значений заполняется протокол наблюдений (таблица 1.1) и ведется обработка экспериментальных данных. Затем производится перерасчет по законам термодинамики и проводится сравнение подобранных значений с получаемыми теоретическим расчетом.

Мнимую (виртуальную) экспериментальную установку можно рассматривать, как плотно закрытый металлический сосуд 3 (рисунок 1.2) соединен с манометром 6 и помещен в емкость 2, наполненную водой. Под емкостью смонтирован электронагреватель 1. Для измерения температуры воздуха в сосуде 3 установлен жидкостный стеклянный термометр 4. Внутренняя полость сосуда 3 краном 5 может быть соединена с атмосферой.

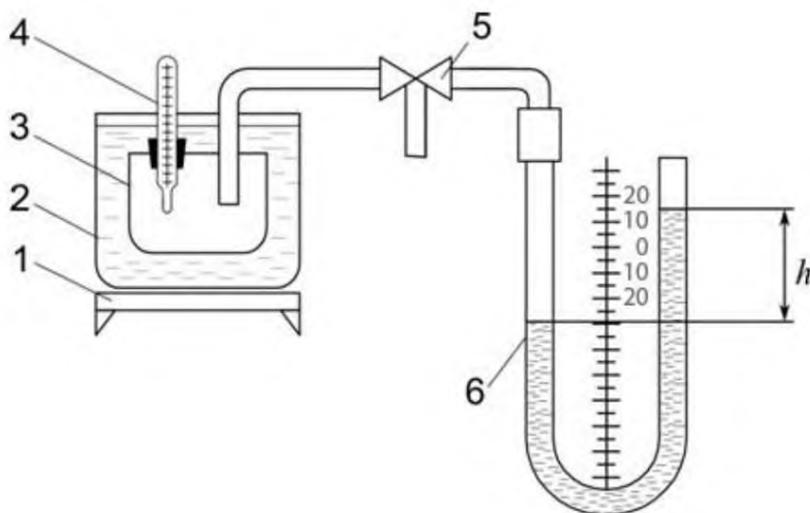


Рисунок 1.2 – Схема виртуальной экспериментальной установки

Порядок выполнения виртуальной работы:

1. Изучить установку и ознакомиться с правилами работы на ней.
2. Установить в системе исходное давление, равное атмосферному, при этом уровни воды в трубочках манометра 6 покажут нуль. Включить нагреватель в сеть.
3. При начале движения мениска U-образного манометра 6 зафиксировать температуру и через каждые 250 мм вод. ст. продолжать регистрировать температуру в сосуде 3 (по термометру) и давление воздуха (величину h по манометру).
4. При давлении 1250 мм вод. ст. опыт прекратить и отключить установку от электрической сети.
5. Зарегистрировать величину атмосферного давления по лабораторному барометру. Данные всех измерений в процессе эксперимента внести в протокол наблюдений по форме, показанный в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Протокол наблюдений

Номер опыта	Температура		Избыточное давление, $p_{\text{изб}}$		Абсолютное давление, $p_{\text{абс}}$
	$t, ^\circ\text{C}$	T, K	мм вод.ст.	Па	Па

Поскольку работа производится виртуально с мысленным подбором экспериментальных данных, то показания водяного манометра принимаются

достаточно высокими – 1200 мм и более. Тогда можно такой манометр заменить на обычный стрелочный и принимать более высокие значения показателя. Данное действие согласуется с преподавателем.

3 Обработка экспериментальных данных

1. Перевести результаты измерений (при необходимости) в единицы СИ. Полученные значения величин записать в таблицу 1.1.

2. Используя полученные данные, построить график $p_{абс}=f(T)$, учитывая, что параметрами состояния воздуха являются абсолютное давление и температура T , выраженная в К:

$$p_{абс}=p_{изб}+p_{атм} \text{ и } T, K=t^{\circ}C+273,15.$$

На этом же графике построить расчетную зависимость $p_{абс}=f(T)$, используя уравнение (1.1) в виде:

$$p_i = p_1 \frac{T_i}{T_1}, \quad (1.7)$$

где p_1 и T_1 – начальные давление и температура воздуха в сосуде (первая точка процесса),

p_i и T_i – параметры последующих точек (2,3 и т.д.).

3. Определить изменение удельной внутренней энергии воздуха за весь процесс (от начальной до конечной точек) при постоянной и переменной теплоемкостях, используя выражения (1.2) и (1.3). Значение постоянной массовой изохорной теплоемкости c_v принять равным 0,721 кДж/(кг·К). Значения средних теплоемкостей за промежуток температуры взять из Приложения А.

4. Определить изменение энтропии воздуха в процессе по формуле (1.4), считая теплоемкость постоянной.

5. Определить разность между измеренным и расчетным давлениями в каждой опытной точке.

Результаты (в абсолютных величинах и в процентах) записываются в таблицу 1.2.

Таблица 1.2 – Результаты расчетов

Параметры и погрешности	Номера опытных точек						
	1	2	3	4	5	6	7
1	2	3	4	5	6	7	8
Температура, К							
Абсолютное давление экспериментальное, Па							
Абсолютное давление расчетное, Па							

Продолжение таблицы 1.2

1	2	3	4	5	6	7	8
Разность между экспериментальным и расчетным давлениями, Па							
Относительная разность экспериментального и расчетного давлений, %							

4 Контрольные вопросы

1. Дать определение основных термодинамических процессов.
2. Как графически изображаются изохора, изобара, изотерма и адиабата на диаграммах $p-v$ и $T-s$?
3. Написать формулы соотношений между параметрами p , v и T для каждого из процессов идеального газа.
4. Почему в адиабатном процессе расширения газа температура убывает, а при сжатии повышается?
5. Объяснить характер взаимного расположения на $p-v$ диаграмме изотермы и адиабаты, проведенных из одной точки, при расширении и сжатии газа.
6. По каким уравнениям вычисляется изменение энтропии в основных термодинамических процессах?
7. Почему на построенных графиках изохорного процесса расчетная изохора не совпадает с экспериментальной?

Лабораторная работа № 2

Свободная и вынужденная конвекция для горизонтальной трубы

Цель работы: изучение процесса свободного и вынужденного конвективного теплообмена.

Задачи:

- установить зависимости коэффициента теплоотдачи α от режима тепловой нагрузки и установить зависимость $Nu=f(Gr)$;
- установить зависимости коэффициента теплоотдачи α при поперечном охлаждении потоком воздуха и установить зависимость $Nu=f(Re)$.

1 Теоретическое введение

Теплоотдачей называется обмен тепловой энергией между поверхностью твердого тела и омывающими ее капельной жидкостью или газом (в дальнейшем будем употреблять термин “жидкость”).

Процесс теплоотдачи в зависимости от причин, вызывающих движение жидкости, протекает по-разному. Теплоотдача бывает конвективной и радиационно-конвективной. При конвективной теплоотдаче теплообмен осуществляется одновременно конвекцией и теплопроводностью, а при радиационно-конвективной – конвекцией, теплопроводностью и излучением. Различают вынужденную и свободную (естественную) конвекции. В первом случае жидкость движется за счет внешних побудителей (насос, вентилятор, обдув нагретой поверхности ветром и т. п.), во втором случае – за счет разности плотностей нагретых и холодных частиц жидкости. Возникновение и интенсивность движения при свободной конвекции всецело определяются тепловыми условиями процесса и зависят от рода жидкости, разности температур и объема пространства, в котором происходит процесс.

Существенное влияние на конвективный теплообмен оказывает характер движения жидкости. Из гидродинамики известно, что существует два основных режима движения: ламинарный и турбулентный. При ламинарном режиме частицы жидкости движутся по эквидистантным траекториям, поперечное перемещение частиц жидкости отсутствует; при турбулентном режиме – неупорядоченно, хаотически, при этом направление и величина скорости отдельных частиц беспрестанно меняются. Для процесса теплоотдачи режим движения имеет большое значение, так как им определяется механизм переноса теплоты.

При ламинарном режиме перенос теплоты в направлении нормали к стенке в основном происходит путем теплопроводности. При турбулентном режиме перенос осуществляется в результате интенсивного перемешивания частиц жидкости.

Для газов и жидкостей интенсивность теплоотдачи в основном определяется термическим сопротивлением ламинарного пристеночного подслоя. Это обстоятельство иллюстрируется на рисунке 2.1, где показано изменение температуры жидкости в направлении нормали к стенке. Как видно, наибольшее изменение температуры происходит в пределах тонкого ламинарного подслоя, через который теплота передается путем теплопроводности. При свободной конвекции температура жидкости в пограничном слое изменяется от $T_{ст}$ до $T_{ж}$, а скорость – от нуля у стенки до некоторого максимального значения и далее на большом удалении от стенки снова падает до нуля (рисунок 2.2).

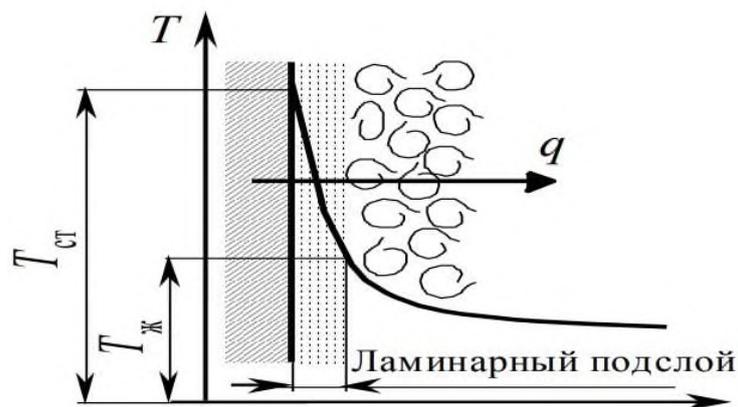


Рисунок 2.1 – Ламинарный пристеночный слой

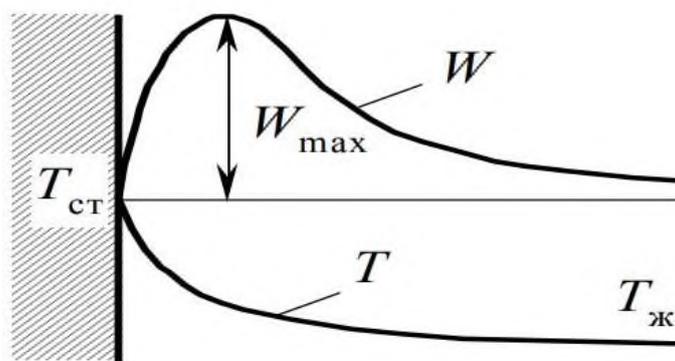


Рисунок 2.2 – Изменение температуры и скорости жидкости (газа)

В развитии свободного движения жидкости форма тела играет второстепенную роль. Здесь большое значение имеют протяженность поверхности, вдоль которой происходит движение, и ее пространственное положение. Характер движения воздуха около нагретой горизонтальной трубы показан на рисунке 2.3. Как видно, ламинарный слой а начинается от нижней точки о, далее по мере движения его толщина увеличивается, характер потока изменяется до тех пор, пока он не становится турбулентным (зона б).

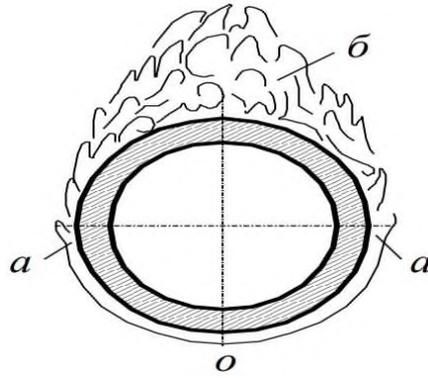


Рисунок 2.3 – Характер движения воздуха около нагретой трубы

При практических расчетах теплоотдачи используют закон Ньютона-Рихмана в следующем виде:

$$\Phi = \alpha F (T_{\text{ст}} - T_{\text{ж}}), \quad (2.1)$$

где Φ – тепловой поток от стенки к жидкости, Вт;
 F – площадь поверхности теплообмена, м²,
 α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К);
 $T_{\text{ст}}$ – температура стенки (поверхности твердого тела);
 $T_{\text{ж}}$ – температура жидкости вдали от стенки.

В общем случае коэффициент теплоотдачи представляет собой сумму коэффициентов теплоотдачи конвекцией $\alpha_{\text{к}}$ и излучением $\alpha_{\text{л}}$. Разность температур стенки и жидкости $\Delta T = T_{\text{ст}} - T_{\text{ж}}$ называется температурным напором. Теплоотдача является сложным процессом, а коэффициент теплоотдачи зависит от большого количества факторов. В наиболее общем случае он является функцией формы и размеров тела, характера движения жидкости, ее физических параметров и ряда других величин. Поэтому аналитическое определение возможно только для простейших случаев. Основным способом определения коэффициента теплоотдачи является эксперимент, а для описания закономерностей процесса теплоотдачи используют аппарат теории подобия физических процессов.

Определение величины $\alpha_{\text{к}}$ представляет значительные трудности, т.к. показатель зависит от многих факторов, например, геометрии поверхности, свойств теплоносителя, температуры и т.д.

Величина $\alpha_{\text{к}}$ определяется обычно из критериальных уравнений, полученных на основании теорий подобия и размерностей. Например, теплоотдача в условиях вынужденной конвекции описывается уравнением:

$$\text{Nu} = c \text{Re}^n \text{Pr}^m, \quad (2.2)$$

а в условиях свободной конвекции

$$Nu=cCr^nPr^m, \quad (2.3)$$

в частности для газов

$$Nu=c\cdot(Cr\cdot Pr)^n. \quad (2.4)$$

В этих уравнениях Nu – это критерий Нуссельта, который служит для определения коэффициента теплоотдачи α_k :

$$\alpha_k = \frac{Nu \cdot \lambda}{l}. \quad (2.5)$$

Понятие о критериях подобия, входящих в этих уравнениях вводится при помощи специальной теории, называемой теорией подобия. Их физический смысл показан в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Основные критерии подобия в теплообмене

Наименование критерия	Формула	Что характеризует
Критерий Нуссельта	$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda}$	интенсивность теплообмена на границе «стенка-жидкость»
Критерий Рейнольдса	$Re = \frac{w \cdot l}{\nu}$	соотношение сил инерции и сил вязкости в потоке жидкости
Критерий Грасгофа	$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta t \cdot l^3}{\nu^2}$	соотношение подъемных сил и вязкости
Критерий Прандтля	$Pr = \frac{\nu}{a}$	физические свойства жидкости

При конвективном теплообмене (теплоотдаче) в случае вынужденного движения жидкости критериальное уравнение имеет вид:

$$Nu=cRe_{ж}^n Pr_{ж}^m \left(\frac{Pr_{ж}}{Pr_{ст}} \right)^{0,25}, \quad (2.6)$$

где c – постоянный коэффициент, величина которого зависит от пространственного положения трубы (для горизонтальной трубы $c=0,61$, для вертикальной $c=1,26$).

Коэффициент теплоотдачи α_k вычисляется (для последующего определения критерия Нуссельта) по доле конвективной составляющей теплового потока:

$$\alpha_k = \frac{Q_k}{H(t_w - t_f)}. \quad (2.7)$$

В свою очередь, конвективная составляющая теплового потока Q_k определяется как полный тепловой поток за вычетом радиационной составляющей $Q_{и}$:

$$Q_k = Q - Q_{и}. \quad (2.8)$$

$$Q_{и} = \varepsilon_{пр} c_0 \left[\left(\frac{T_w}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_f}{100} \right)^4 \right] H, \quad (2.9)$$

где $\varepsilon_{пр}$ – приведенная степень черноты;

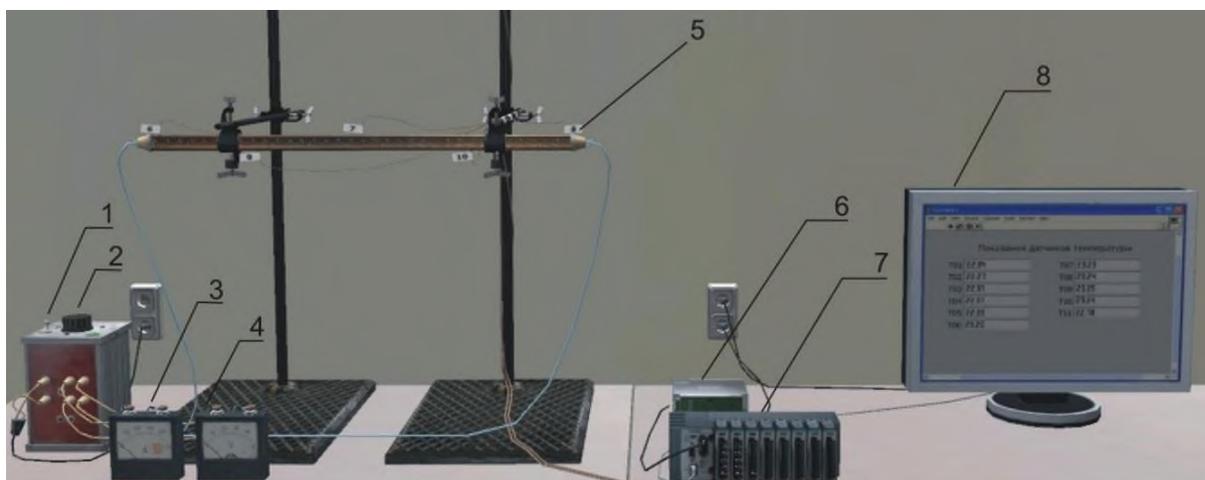
$c_0 = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ – коэффициент излучения абсолютно черного тела.

2 Выполнение работы

2.1 Лабораторная установка и правила

Лабораторная работа выполняется в моделирующей программе на виртуальной экспериментальной установке.

Схемы экспериментальной установки, отображаемые на мониторе компьютера, показаны на рисунках 2.4, 2.5 и 2.6.



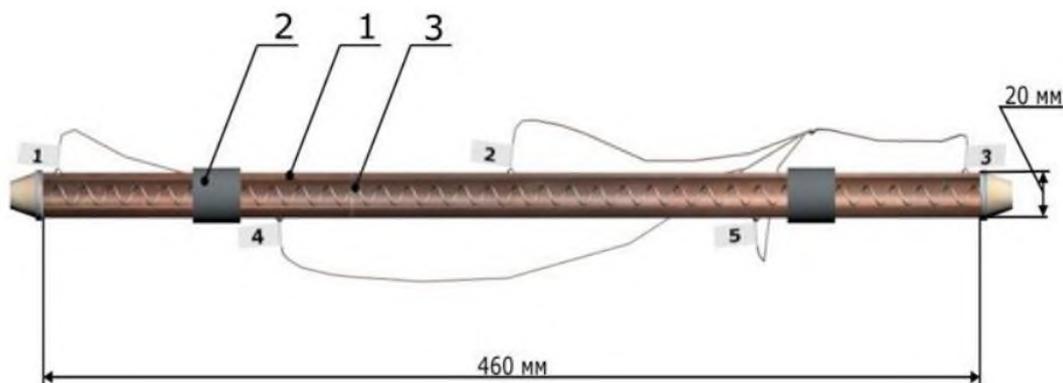
1 – тумблер включения/выключения реостата; 2 – реле-регулятор; 3 - амперметр; 4 – вольтметр; 5 – медная трубка; 6 – блок питания; 7 – контроллер CompactRIO + модули МЮ 9481; 8 – промышленный монитор

Рисунок 2.4 - Схема экспериментальной установки

Исследуемое тело представляет собой трубку, выполненную из меди и имеющую диаметр $d = 20 \text{ мм}$. Длина трубки $L = 460 \text{ мм}$, расположение – горизонтально. Внутри трубки размещены электронагреватели из нихромовой проволоки, служащие источником тепла. Тепло выделяемое электронагревателем, передается через поверхность трубки в окружающую среду. Полная теплоотдача Q с

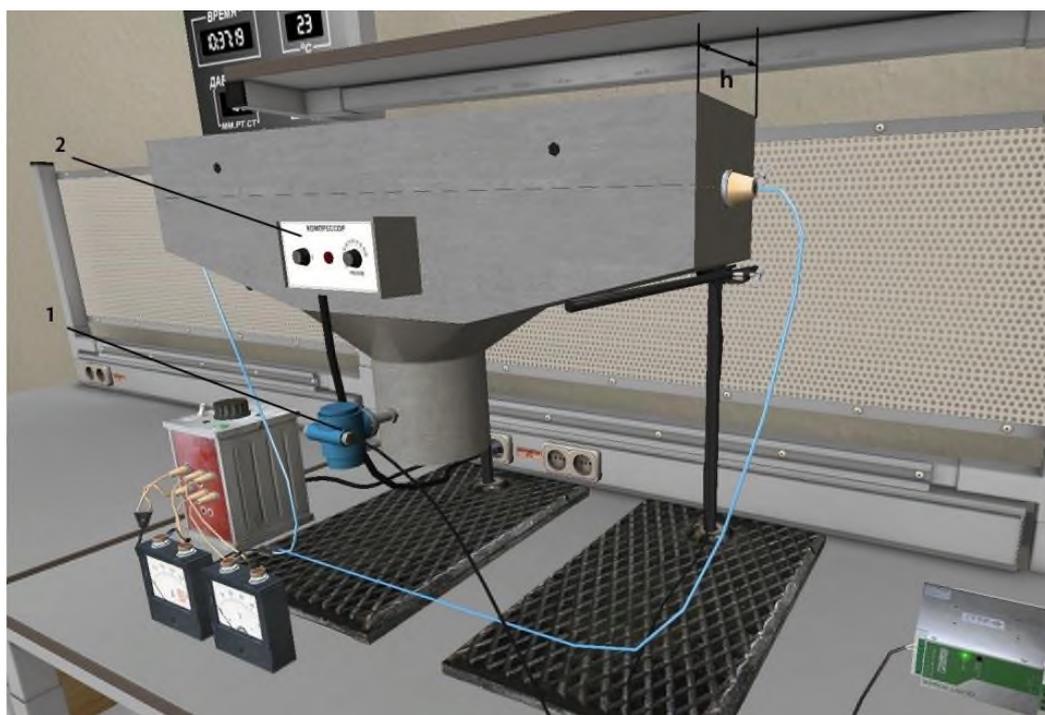
поверхности трубки определяется по расходу электроэнергии. Потребляемая мощность электроэнергии изменяется регулятором и измеряется амперметром и вольтметром.

Для измерения температуры поверхности в стенках трубки заложено по 5 медь-константовых термопар. Термопары поочередно подключаются к измерительному прибору (контроллеру).



1 – медная труба; 2 – изоляция; 3 – нагревательный элемент

Рисунок 2.5 - Экспериментальный элемент



1 – расходомер воздуха; 2 – компрессор; h – ширина корпуса компрессора

Рисунок 2.6 - Экспериментальный элемент

Правила при выполнении лабораторной работы:

- перед проведением лабораторной работы необходимо ознакомиться с ее содержанием, повторить или изучить теоретический материал данного раздела;
- в тетрадь заносятся: схема установки, таблицы для записи наблюдений, расчетные уравнения, технические данные измерительных приборов;

- необходимые измерения производятся при установившемся тепловом режиме (не менее 30-40 секунд после включения установки) и записываются в соответствующие графы журнала наблюдений;
- при выходе приборов из строя или при обнаружении неисправности немедленно сообщить об этом лаборанту или преподавателю;
- после проведения измерений производится обработка результатов опыта.

2.2 Алгоритм проведения опыта

1-й опыт «Свободная конвекция»

После ознакомления с теорией и устройством установки можно приступить к проведению эксперимента. Работа выполняется в двух режимах, отличающихся величиной теплового потока, выделяемого трубкой. Оба режима должны быть стационарными.

1. После включения установки при помощи реле-регулятора устанавливается температура согласно заданию преподавателя.

2. Убедившись, что режим работы установки стационарный (установившийся), проводится не менее 3-х замеров с интервалом 1-2 минуты.

После снятия необходимых параметров 1-го режима установка переводится в следующий режим.

Время, необходимое для установления стационарности нового режима, составляет примерно 30-60 секунд.

Данные замеров заносятся в журнал наблюдений (образец приведен в таблице 2.1).

2-й опыт «Вынужденная конвекция»

1. Установите компрессор на штатив и подключите к блоку питания и контроллерам.

2. При помощи реле-регулятора устанавливается температура согласно заданию преподавателя и включается компрессор с требуемым расходом воздуха.

3. Убедившись, что режим работы установки стационарный (установившийся), проводится не менее 3-х замеров с интервалом 1-2 минуты.

После снятия необходимых параметров 1-го режима установка переводится в следующий режим.

Время, необходимое для установления стационарности нового режима, составляет примерно 30-60 секунд.

Данные замеров заносятся в журнал наблюдений (образец приведен в таблице 2.1).

Таблица 2.1 – Журнал наблюдений

	Номер замера		
	1	2	3
Напряжение на нагревателе U , В			
Сила тока на нагревателе I , А			
Тепловой поток $Q=U \cdot I/2$, Вт			
Температура поверхности трубки T_1 , К			
Температура поверхности трубки T_2 , К			
Температура поверхности трубки T_3 , К			
Температура поверхности трубки T_4 , К			
Температура поверхности трубки T_5 , К			
Температура воздуха T_6 , К			
Среднее значение температуры поверхности трубки T_{cp} , К			
Объемный расход воздуха V , м ³ /с (только для вынужденной конвекции)			

3 Обработка экспериментальных данных

Расчет и обработка данных ведется по таблицам 2.2 и 2.3.

Таблица 2.2 – Расчет данных для свободной конвекции

Наименование величин	Обозначение	Расчетные формулы	Номер замера		
			4	5	6
1	2	3			
Температура поверхности трубы	T_w	-			
Температура окр. среды	T_f	-			
Тепловой поток	Q	$Q=I \cdot \Delta U$			
Поверхность трубы	H	$H=\pi dl$			
Величина лучистого теплового потока	$Q_{и}$	формула (2.9)			
Конвективная составляющая теплового потока	$Q_{к}$	формула (2.8)			
Коэффициент теплоотдачи опытный	$\alpha_{к}$	формула (2.7)			
Коэффициент кинематической вязкости	ν_f	-			

Продолжение таблицы 2.2

1	2	3	4	5	6
Критерий Прандтля	Pr				
Коэффициент теплопроводности	λ_f	-			
Коэффициент объемного расширения	β	$\beta = 1/T_f$			
Критерий Нуссельта	Nu	$Nu = \frac{\alpha_k \cdot l}{\lambda_f}$			
Критерий Грасгофа	Gr	$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot (t_w - t_f) \cdot l^3}{\nu_f^2}$			
Произведение Gr · Pr	-	-			
Расчетный критерий Нуссельта	Nu_p	$Nu_p = c(Cr \cdot Pr)^n$			
а) показатель	n				
б) постоянная (выбирается из таблицы 2.2)	c				
Коэффициент теплоотдачи (расчетный)	α_p	$\alpha_p = \frac{Nu_p \cdot \lambda_f}{l}$			

Таблица 2.3 – Расчет данных для принудительной конвекции

Наименование величин	Обозначение	Расчетные формулы	Номер замера		
			4	5	6
1	2	3	4	5	6
Температура пов-сти трубы	T_w	-			
Температура окр. среды	T_f	-			
Тепловой поток	Q	$Q = I \cdot \Delta U$			
Поверхность трубы	H	$H = \pi d l$			
Площадь проходного сечения около трубки	S	$S = l \cdot (h - d)$			
Величина лучистого теплового потока	$Q_{\text{л}}$	формула (2.9)			
Конвективная составляющая теплового потока	$Q_{\text{к}}$	формула (2.8)			
Коэффициент теплоотдачи опытный	$\alpha_{\text{к}}$	формула (2.7)			
Коэффициент кинематической вязкости	ν_f	-			

Продолжение таблицы 2.3

1	2	3	4	5	6
Критерий Прандтля	Pr				
Коэффициент теплопроводности	λ_f	-			
Коэффициент объемного расширения	β	$\beta = 1/T_f$			
Критерий Нуссельта	Nu	$Nu = \frac{\alpha_k \cdot l}{\lambda_f}$			
Скорость воздуха	w	$w = V/S$			
Число Рейнольдса	Re	$Re_{\text{жд}} = w \cdot d / \nu$			

Отчет должен содержать следующие пункты:

- задание;
- краткое описание работы;
- принципиальная схема установки;
- журнал наблюдений;
- обработка результатов опытов;
- сопоставление полученных данных между собой и со справочными данными.

4 Контрольные вопросы

1. Какова природа теплового излучения? От каких факторов зависит излучение тел?
2. Что такое селективный спектр и монохроматическое излучение?
3. Дайте определение абсолютно черного и серого тел, поглощательной способности степени черноты. Докажите, что коэффициент поглощения серого тела равен степени его черноты.
4. Особенности процесса теплоотдачи при поперечном обдуве трубки. Формирование пограничного слоя, его влияние на интенсивность теплообмена.
5. Закон Ньютона-Рихмана. Физический смысл коэффициента теплоотдачи.

Лабораторная работа № 3

Определение коэффициента теплопроводности твердых тел методом трубы

Цель работы: Изучение процесса теплопроводности.

Задачи работы:

- ознакомиться с одним из экспериментальных методов исследования теплопроводности;
- получить навыки в проведении эксперимента;
- определить коэффициент теплопроводности исследуемых материалов;
- установить зависимость коэффициентов теплопроводности от температуры;
- сопоставить между собой полученные данные со справочными данными;
- составить отчет по проделанной работе.

1 Теоретическое введение

Теплопроводность представляет собой процесс распространения тепла путем непосредственного соприкосновения беспорядочно движущихся (колеблющихся) структурных частиц вещества – молекул, атомов, электронов. Это так называемый молекулярный способ переноса тепловой энергии, который может осуществляться в любых термически неравновесных (т.е. имеющих различные температуры) телах или системах тел. В основу теории теплопроводности положен закон Фурье – тепловой поток прямо пропорционален температурному градиенту:

$$Q = -\lambda \frac{dt}{dn} F, \quad (3.1)$$

где F – площадь поверхности, через которую проходит тепло, m^2 ;

λ - коэффициент теплопроводности;

dt/dn - температурный градиент, K/m .

Коэффициент теплопроводности характеризует способность тел проводить тепло:

$$\lambda = \frac{|Q|}{\left| F \cdot \frac{dt}{dn} \right|}. \quad (3.2)$$

По своему физическому смыслу коэффициент теплопроводности представляет собой количество тепла, проходящего в единицу времени через единицу изотермической поверхности при температурном градиенте, равном единице, или другими словами, это тепловой поток в единицу времени через единицу изо-

термической поверхности при изменении температуры на единицу толщины стенки в один градус. Коэффициент теплопроводности зависит от природы тела, его пористости, влажности, давления, температуры и других параметров. Для всех материалов с изменением температуры λ изменяется по линейному закону во всем рассматриваемом интервале температур:

$$\lambda = \lambda_0(1 \pm bt), \quad (3.3)$$

где λ_0 – коэффициент теплопроводности при 0°C ,

b – постоянная, характеризующая приращение (уменьшение) λ материала при повышении его температуры на 1°C .

Численное значение коэффициента теплопроводности определяется опытным путем различными методами (шара, плиты и др). Для теплоизоляционных материалов ($\lambda \leq 0,3$ [Вт/м·К]) наибольшее распространение получил метод трубы (цилиндра), сущность которого заключается в следующем.

При установившемся тепловом режиме количество тепла Q , передаваемого в единицу времени от внутренней поверхности цилиндра к наружной на участке длиной L , определяется согласно закону Фурье для цилиндрической стенки:

$$Q = \frac{2\lambda\pi L(t_1 - t_2)}{\ln \frac{d_2}{d_1}}. \quad (3.4)$$

Установившийся (стационарный) режим предполагает неизменность температур t_1 и t_2 на внутренней и внешней поверхностях стенки диаметром, соответственно d_1 и d_2 , в различные моменты времени.

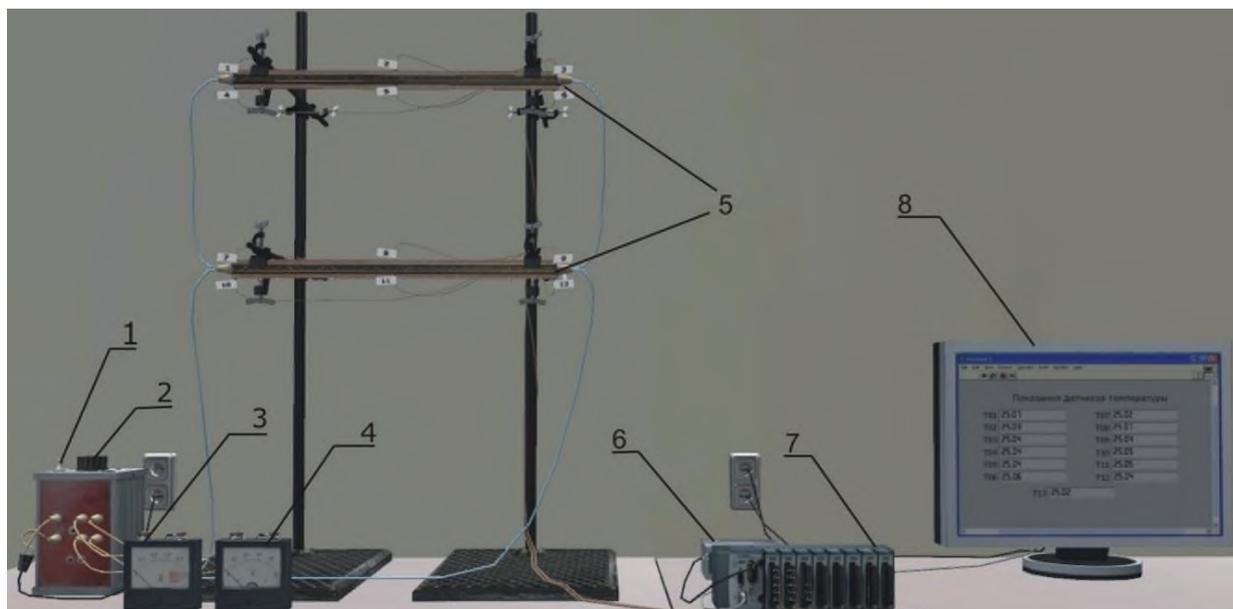
Таким образом, если коэффициент теплопроводности рассматривать как постоянную в диапазоне температур $t_1 - t_2$ величину, то измерив значения t_1 , t_2 , Q , его можно вычислить из уравнения:

$$\lambda = \frac{Q \ln \frac{d_2}{d_1}}{2\pi L(t_1 - t_2)}. \quad (3.5)$$

2. Лабораторная установка

Экспериментальная установка, принципиальная схема которой изображена на рисунке 3.1, предназначена для определения коэффициентов теплопроводности двух различных материалов.

Ход выполнения работы подразумевает запуск установки в трех режимах с поэтапным увеличением мощности источника (реостата) со съемом показаний температуры каждой трубы и изоляции поверх нее.



- 1 – тумблер включения/выключения реостата; 2 – реле-регулятор;
 3 - амперметр; 4 – вольтметр; 5 – испытательные элементы установки с термопарами; 6 – блок питания; 7 – контроллер CompactRIO + модули МІО 9481;
 8 – промышленный монитор

Рисунок 3.1 – Виртуальная лабораторная установка

На каждой трубке расположено 6 термопар. Три из них замеряют температуру самой трубки в разных точках ее поверхности, что подразумевает замер температуры внутренней поверхности теплоизоляции, нанесенной на трубку. Другие три термопары измеряют температуры наружной поверхности теплоизоляции.

Две горизонтальные трубки одинаковых размеров покрыты теплоизоляцией из разных материалов, теплопроводность которых необходимо определить экспериментальным путем.

Размеры изоляции: внутренний диаметр $d_1=12$ мм, наружный диаметр $d_2=24$ мм, длина трубки – 350 мм.

3 Алгоритм проведения лабораторной работы

1. Запустите лабораторную программу
2. Посредством тумблера включите источник питания
3. Вращая ручку реостата выставите силу тока в пределах 0,15-0,25 А и зафиксируйте значение напряжения.
4. Снимите показания всех двенадцати термопар для двух элементов.
5. Занесите все результаты замеров в журнал наблюдений (таблица 3.1).
6. Рассчитать тепловой поток Q по формуле:

$$Q = \frac{U \cdot I}{2} \quad (3.6)$$

7. По полученным результатам измерений рассчитать коэффициент теплопроводности для каждого значения теплового потока по формуле (3.5).

8. Все результаты измерений вносятся в журнал наблюдений. Образец журнала показан в таблице 3.1.

9. Сравнить результаты замеров и в случае несовпадения сделать заключение о причинах неправильных результатов.

10. Написать вывод к работе.

Таблица 3.1 – Журнал наблюдений

Параметр	Элемент 1						Элемент 2					
	Режим 1		Режим 2		Режим 3		Режим 1		Режим 2		Режим 3	
Напряжение на источнике, В												
Ток нагрузки, А												
Тепловой поток, Вт												
Показания термомпар, °С												
T1	T2	T7	T8									
T3	T4	T9	T10									
T5	T6	T11	T12									
Средняя температура, °С												
Расчетный показатель λ , Вт/(м·°С)												

4 Контрольные вопросы

1. Какие факторы влияют на величину коэффициента теплопроводности? Опишите особенности теплопроводности различных веществ.

2. Что называется градиентом температуры?

3. Что такое изотермическая поверхность? Какой вид имеют изотермические поверхности в теплоизоляционном слое при стационарном режиме?

4. Вывести уравнение теплопроводности через плоскую и цилиндрическую стенки.

5. Сформулируйте граничные условия первого рода.

6. Назовите все виды переноса теплоты и дайте их определение.

Лабораторная работа № 4

Исследование процессов изменения параметров влажного воздуха

Цель работы: определить изменение состояния влажного воздуха в процессах нагрева и сушки.

Задачи работы:

- измерить параметры влажного воздуха в процессах нагрева и сушки;
- определить термодинамические параметры влажного воздуха;
- построить в H,d – диаграмму;
- рассчитать расходы влажного и сухого воздуха через установку;
- рассчитать количество сухого воздуха, необходимого для испарения 1 кг влаги;
- рассчитать количество теплоты, затраченной в калорифере, необходимой для нагрева воздуха при испарении им 1 кг влаги;
- рассчитать потери теплоты в окружающую среду в калорифере и сушильной камере в расчете на 1 кг испаренной влаги.

1 Теоретическое введение

Влажный воздух можно рассматривать как смесь сухого воздуха и водяного пара (жидкую и твердую фазы воды в воздухе пока считаем отсутствующими). Используя законы для смесей газов, получим, что давление влажного воздуха равно сумме парциальных давлений сухого воздуха и водяного пара $P = P_v + P_n$. Для наглядности представления основных характеристик влажного воздуха изображаются в P,v -диаграмме (рисунок 4.1) состояния водяного пара во влажном воздухе. В качестве определяющих параметров водяного пара во влажном воздухе используются температура воздуха t и парциальное давление пара P_n .

Водяной пар во влажном воздухе может находиться в трех состояниях (рисунок 4.1): точка 1 - перегретый пар, точка 2 - сухой насыщенный пар, точка 3 - влажный насыщенный пар (сухой насыщенный пар плюс капельки жидкости в состоянии насыщения). Высшим пределом парциального давления водяных паров при данной температуре воздуха t является давление насыщения пара $P_{n\max}=P_n$. Абсолютная влажность ρ - это массовое количество водяных паров в одном кубическом метре влажного воздуха. Для ее определения используется величина, обратная удельному объему водяного пара при P_n и t , $\rho=1/v$ (кг/м³).

Действительно, по закону Дальтона водяной пар занимает весь объем смеси, а его плотность соответствует массе водяного пара в одном кубическом метре влажного воздуха.

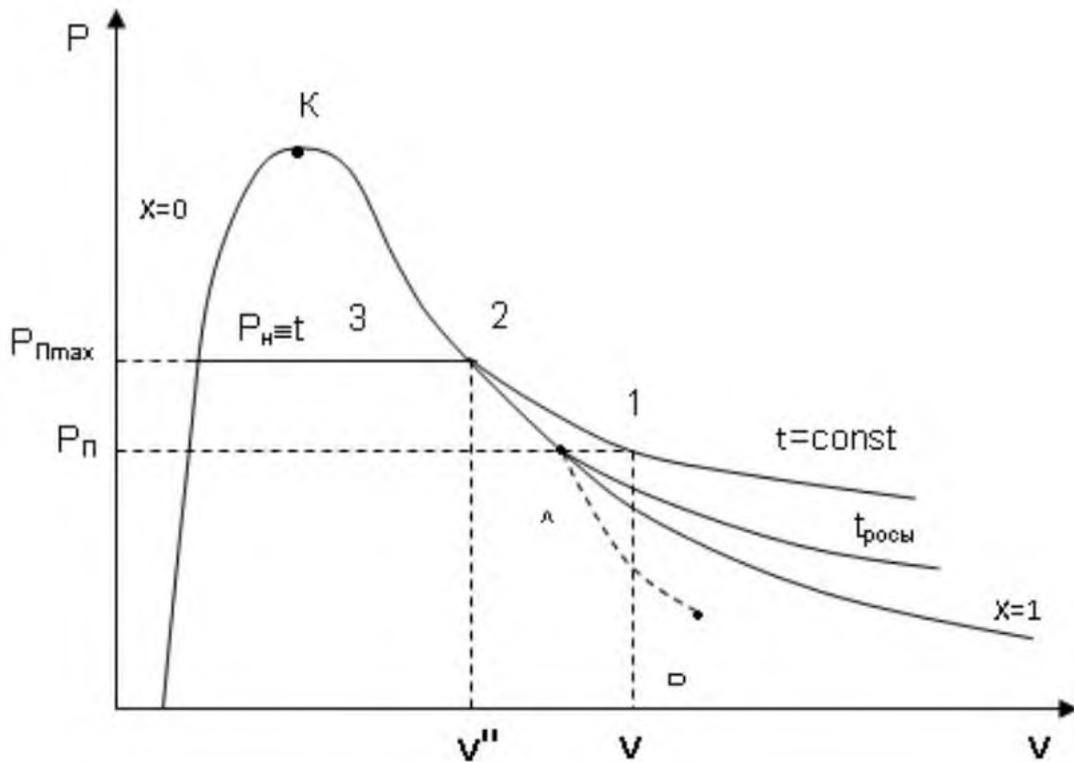


Рисунок 4.1 - Основные состояния и характеристики водяного пара во влажном воздухе в P, v - диаграмме

Необходимо отметить, что абсолютная влажность воздуха характеризует содержание в воздухе только одной - паровой фазы воды. Относительная влажность φ - это отношение абсолютной влажности к максимально возможной влажности воздуха при данной температуре:

$$\varphi = \frac{\rho}{\rho''} = \frac{v''}{v}, \quad (4.1)$$

где ρ'' , v'' - максимальная абсолютная влажность воздуха и удельный объем сухого насыщенного водяного пара при данной температуре t .

Относительная влажность воздуха характеризует потенциальную возможность воздуха испарять влагу и забирать в себя пар из окружающей среды при данной температуре.

Максимальное содержание пара в воздухе соответствует точке 2 в P, v - диаграмме, где пар сухой насыщенный. При переходе в область влажного пара при данной t (точка 3) в воздухе количество сухого насыщенного пара остается постоянным и соответствует точке 2. Для паровой фазы воды в этом случае удельный объем остается неизменным $v'' = \text{const}$ и минимально возможным при данной температуре воздуха, только к нему добавляются капельки воды в состоянии насыщения.

Различают 3 состояния влажного воздуха:

1. Ненасыщенный влажный воздух - ($\varphi < 100\%$, $P_{\text{п}} < P_{\text{н}}$, $\rho < \rho''$) водяной пар во влажном воздухе в виде перегретого пара (точка 1).

2. Насыщенный влажный воздух - ($\varphi = 100\%$, $P_{\text{п}} = P_{\text{н}}$, $\rho = \rho''$) водяной пар во влажном воздухе в виде сухого насыщенного (точка 2).

3. Перенасыщенный влажный воздух - ($\varphi = 100\%$, $P_{\text{п}} = P_{\text{н}}$, $\rho = \rho''$) кроме сухого насыщенного пара в воздухе находятся капельки воды в состоянии насыщения или льда, снега (точка 3 при наличии капелек воды).

В технике используется такая характеристика влажного воздуха, как температура точки росы. Это такая температура, начиная с которой при охлаждении влажного воздуха при постоянном давлении из него начинается выпадение капелек воды (точка А процесса 1-А, рисунок 4.1). При снижении температуры ниже точки росы при постоянном давлении всей смеси и постоянном содержании в ней H_2O (процесс А-В) парциальное давление водяного пара уменьшается ($P_{\text{вп}} < P_{\text{п}}$), количество сухого насыщенного пара уменьшается, а количество капелек воды увеличивается. В этом случае в P, v - диаграмме процесс А-В пойдет в области влажного пара с уменьшением степени сухости по мере снижения температуры.

Психрометр - это прибор для определения влагосодержания атмосферного воздуха. Он состоит из двух термометров: сухого и мокрого (рисунок 4.2). Мокрый термометр обернут тканью, смачиваемой водой.

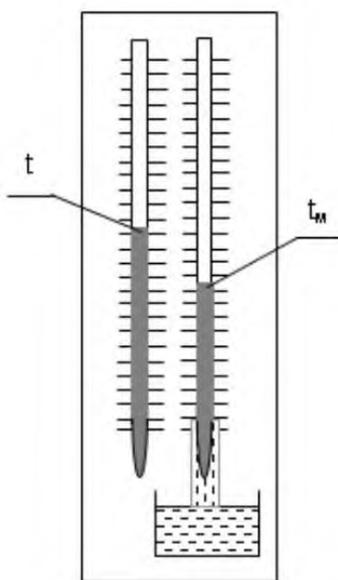


Рисунок 4.2 – Прибор «Психрометр»

Сухой термометр показывает температуру t атмосферного влажного воздуха. Мокрый термометр показывает температуру t_m , которая в большинстве случаев меньше температуры сухого термометра. Понижение температуры t_m по отношению к температуре t вызвано испарением воды из ткани. Однако t_m будет больше температуры точки росы вследствие наличия теплообмена влажной тка-

ни с окружающей средой, имеющей температуру $t > t_m$. При насыщенном влажном воздухе вода не может испаряться из ткани и $t = t_m$. При ненасыщенном влажном воздухе $t > t_m$. Чем суше воздух, тем больше разница температур $t - t_m$ и тем меньше его влагосодержание. Зависимость влагосодержания $d_{\text{п}}$ для атмосферного воздуха от t и t_m устанавливается экспериментально. Результаты этих испытаний сводятся в психрометрические таблицы (Приложение Б), которыми пользуются для определения влагосодержания воздуха по показаниям температур психрометра.

Для упрощения определения параметров атмосферного влажного воздуха используют H, d - диаграмму влажного воздуха. Она строится для постоянного давления воздуха (обычно $P = 745$ мм рт.ст.), но поскольку парциальное давление водяного пара на несколько порядков меньше давления влажного воздуха, а атмосферное давление изменяется в небольших пределах, то, с достаточной для инженерных расчетов степенью точности, ими можно пользоваться и при других атмосферных давлениях воздуха.

Построение H, d - диаграммы влажного воздуха основано на расчетном выражении энтальпии атмосферного влажного воздуха:

$$H = t + \frac{d_{\text{н}}}{1000} \cdot (2501 + 1,93t) + \frac{d_{\text{ж}}}{1000} \cdot 4,187t + \frac{d_{\text{т}}}{1000} \cdot (335 + 2,1t). \quad (4.2)$$

Построение H, d -диаграммы в прямоугольной системе координат не выполняется. Это объясняется большим углом наклона изотерм к оси d в прямоугольной системе координат для области ненасыщенного влажного воздуха. Тангенс их угла наклона к оси d определяется выражением $(\partial H / \partial d)_t = (2501 + 1,937t) / 1000$, что соответствует углу, близкому к 90° . В такой системе координат все изотермы в области ненасыщенного влажного воздуха будут располагаться очень близко друг к другу и к оси H . Работа с такой диаграммой практически невозможна.

H, d -диаграмму выполняют в косоугольной системе координат, как правило, с углом между осями H и d в 135° . Это позволяет увеличить по сравнению с прямоугольной системой координат расстояние между изотермами и линиями других характеристик ненасыщенного влажного воздуха в H, d -диаграмме.

Внешний вид H, d -диаграммы показан на рисунке 4.3.

Ось координат влагосодержаний d имеет нулевое начало. Вертикальные линии в H, d - диаграмме представляют линии постоянных влагосодержаний $d = \text{const}$. Линии постоянных энтальпий $H = \text{const}$ параллельны оси d и идут под углом 135° к оси H .

Для ненасыщенного влажного воздуха в H, d - диаграмме (область выше линии $\varphi = 100\%$) изображение изотерм $t = \text{const}$ ведется в соответствии с уравнением энтальпии для этой области, когда в воздухе может присутствовать только

паровая фаза воды.

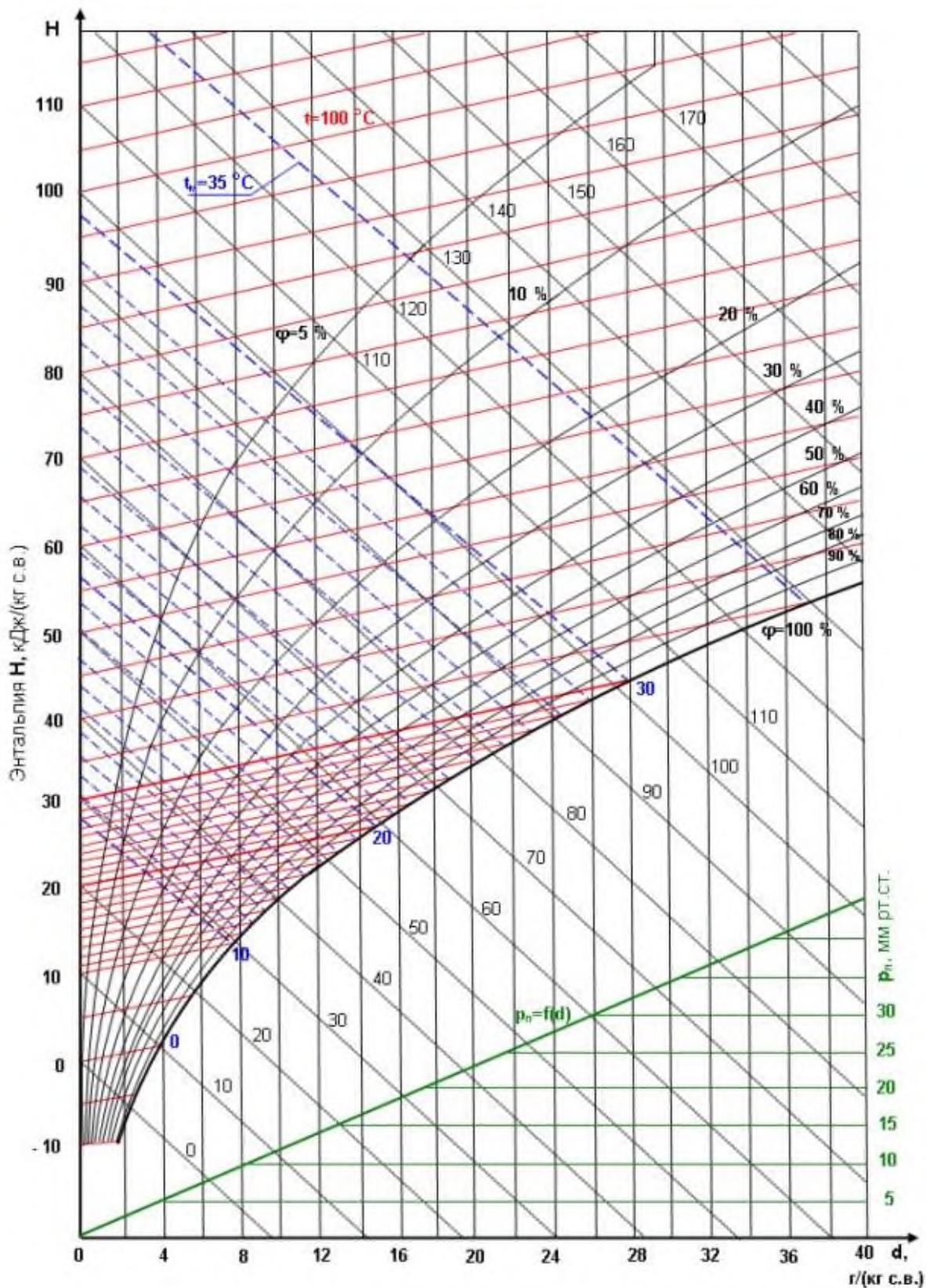


Рисунок 4.3 – H,d-диаграмма для влажного воздуха

Изотермы в этой области представляют собой близкие к параллельным прямые линии с угловым коэффициентом $(\partial H/\partial d)_t = (2501 + 1,937t)/1000$. Незначи-

тельное веерное расхождение изотерм вызвано произведением $1,937t$.

При $d=0$ получается равенство $H=t$, т.е. численные значения энтальпий и температур на оси H одинаковы. Поэтому ось энтальпий одновременно выполняет и роль оси температур.

Каждой точке изотермы соответствует определенное значение относительной влажности воздуха φ . Это объясняется тем, что $P=\text{const}$ и при $t=\text{const}$ парциальное давление насыщения водяного пара постоянно $P_n=f(t)=\text{const}$.

Следовательно, на изотерме H,d - диаграммы влагосодержание пара однозначно определяет относительную влажность:

$$\varphi = \frac{d_n P}{(d_n + 622) P_n} \quad (4.3)$$

Соединив на изотермах точки с одинаковыми φ , получают линии постоянных относительных влажностей воздуха $\varphi=\text{const}$. Например, точке 1 на изотерме t_1 влагосодержанию пара d_1 соответствует относительная влажность φ_1 . При этом $\varphi=0$ соответствует $d=0$, т.е. линия $\varphi=0$ совпадает с осью энтальпий H . Таким образом, ось энтальпий H в H,d - диаграмме выполняет три функции: является осью энтальпий, осью температур, линией постоянной относительной влажности воздуха $\varphi=0$. Линия постоянной максимальной относительной влажности $\varphi=100\%$, соответствующая влажному насыщенному воздуху, в H,d -диаграмме при $d=\infty$ стремится к изотерме 100°C , т.к. в этом случае P_n стремится к атмосферному давлению P и $\varphi=1$ при $d=\infty$.

При $\varphi < 100\%$ линии $\varphi=\text{const}$, достигая изотермы 100°C , превращаются в вертикальные прямые. В этом случае давление насыщения водяного пара становится равным атмосферному давлению (около 1 бар) и при дальнейшем увеличении температуры больше изменяться не может ($P_n=P=\text{const}$). Соответственно не меняется при $\varphi=\text{const}$ в этой области и влагосодержание:

$$d_n = 622 \frac{\varphi}{1-\varphi}, \quad (4.4)$$

т.е. линии $\varphi=\text{const}$, идущие выше изотермы $t=100^\circ\text{C}$, в H,d - диаграмме представляют вертикальные прямые.

Поскольку давление насыщения водяного пара с уменьшением температуры уменьшается, то и влагосодержание пара для ненасыщенного влажного воздуха $d=622\varphi P_n/(P-\varphi P_n)$ на линии $\varphi=\text{const}$ в области низких температур будет меньше, чем влагосодержание пара на этих же линиях в области высоких температур. Поэтому линии $\varphi=\text{const}$ с уменьшением влагосодержания воздуха пере-

мещаются в область более низких температур и приближаются к оси Н. В области отрицательных температур линии $\varphi = \text{const}$ в Н,d- диаграмме расположены очень близко друг к другу и приближаются к оси Н почти вплотную.

Для полноты информации о влажном воздухе на Н,d- диаграмму накладывается прямоугольная диаграмма $P_{\text{п}} = f(d)$, отражающая зависимость парциального давления водяного пара от влагосодержания водяного пара в воздухе $d_{\text{п}} = 622 P_{\text{п}} / (P - P_{\text{п}})$. Поскольку полное давление воздуха P намного больше парциального давления пара $P_{\text{п}}$, зависимость $P_{\text{п}} = f(d)$ представляет собой практически прямую линию.

В области перенасыщенного влажного воздуха (ее называют областью тумана, она расположена в Н,d-диаграмме ниже линии $\varphi = 100\%$) кроме паровой фазы в воздухе может присутствовать жидкая или твердая фаза воды. При атмосферном давлении воздуха и температуре выше $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ могут одновременно существовать только паровая и жидкая фазы воды, а при температурах ниже $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ - только паровая и твердая (лед, снег) фазы воды, и только при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ могут одновременно существовать все три фазы воды. Такое поведение воды в атмосферном воздухе объясняется тем, что жидкая фаза воды при отрицательных температурах может существовать только при давлениях выше давления тройной точки воды P_0 , а максимальное парциальное давление водяного пара в атмосферном воздухе при этих температурах не может быть больше этого давления.

2 Выполнение работы

Лабораторная работа выполняется в моделирующей программе на компьютере, отображающей работу лабораторной установки в анимационном режиме в реальном времени. Внешний вид лабораторной установки, отображаемый на экране компьютера при проведении работы, показан на рисунке 4.4.

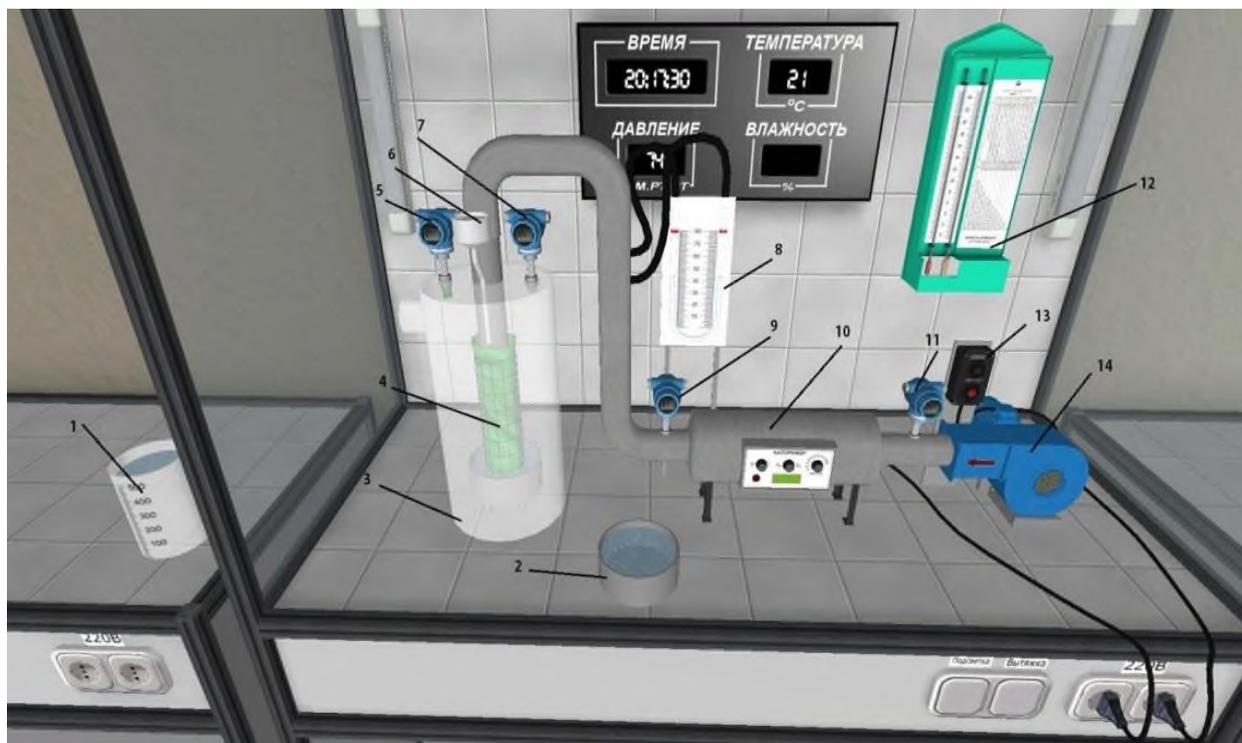
Воздух после включения воздуходувки (14) подаётся в калорифер (10), где он нагревается с помощью электротэнов, температура на входе и выходе калорифера измеряется термопарами Т1 (11) и Т2 (9), расход воздуха определяется по перепаду давления на U образном манометре (8). Далее нагретый воздух поступает в сушильную камеру (3), где он, проходя через отверстия трубки, испаряет влагу из ткани (4), которой обернута снаружи трубка. Вода подается на ткань через капельницу (6). Забрав в себя испаренную из материи влагу, воздух при температуре, фиксируемой сухой Т3 (7) и мокрой Т4 (5) термопарами выходит из сушильной камеры в помещение лаборатории.

Порядок выполнения на виртуальной лабораторной установке:

1. Зафиксировать показания лабораторного барометра и психрометра.
2. Смочить ткань (4) в сушильной камере дистиллированной водой, залив ее из стакана (1) в капельницу (6).

3. Вынуть термомпару Т4 (5) из гильзы и смочить ткань на ней дистиллированной водой в ёмкости (2). Установить термомпару в гильзу. Смачивания производить через 10 минут.

4. Включить воздуходувку, нажав на пульте управления "пуск" и проконтролировать, что воздуходувка обеспечивает поток воздуха через сушильную камеру по показаниям U-образного манометра (в пределах 20-40 мм водн. ст.).



- 1 – мерный стакан с водой; 2- ёмкость с водой; 3 - сушильная камера;
4 – смоченная водой ткань; 5 - термометр Т4; 6 – капельница воды;
7 - термометр Т3; 8 - U-образный манометр; 9 - термометр Т2; 10 - калорифер; 11
- термометр Т1; 12 - психрометр; 13 - пульт управления воздуходувкой;
14 - воздуходувка

Рисунок 4.4 – Вид виртуальной лабораторной установки

5. Включить кнопку питания калорифера и установить требуемое напряжение на нагревателе калорифера с помощью регулятора "нагрев" U_n (в диапазоне 80 - 120 В).

6. Зафиксировать показания приборов стенда:

- измеряющего напряжение U_0 ;
- измеряющего перепад давлений на расходомерной диафрагме Δh ;
- температуры Т1, Т2, Т3, Т4;
- время.

7. Отключение установки происходит в обратном порядке по отношению к включению:

- регулятором "нагрев" устанавливается $U_n=0$ и отключается нагреватель

калорифера;

- кнопкой "стоп" отключается воздуходувка.

3 Обработка экспериментальных данных

Журнал наблюдений показан в таблице 4.1.

Атмосферное давление - В, мм рт. ст., U_n - напряжение на нагревателе в Вольтах, U_o - напряжение на образцовом сопротивлении в Вольтах, Δh - перепад давлений на расходомерной диафрагме в мм вод. ст., T_1, T_2 – температуры на входе и выходе из калорифера в °С, T_3, T_4 – температура сухого и мокрого термометра на выходе из сушильной камеры в °С,

Показания психрометра в лаборатории: сухого t_o , °С, мокрого t_{om} , °С.

Таблица 4.1 – Образец журнала наблюдений

№	U_n , В	U_o , В	Δh , мм	T_1 , °С	T_2 , °С	T_3 , °С	T_4 , °С
1							
2							
3							
4							
5							

3.1 Определение массового расхода сухого воздуха через установку

Определение массового расхода влажного воздуха через установку $G_{ВВ}$ в кг/с выполняется по формуле для расходомерной диафрагмы:

$$G_{ВВ} = \varphi f \sqrt{2\rho_2 \Delta p}, \quad (4.5)$$

где φ - коэффициент расхода диафрагмы, определяется при ее тарировке,

f – площадь минимального сечения отверстия диафрагмы в m^2 ,

ρ_2 - плотность воздуха на входе в диафрагму в kg/m^3 ,

Δp – перепад давлений на диафрагме, Па.

Для упрощения расчетов выражение (4.2) будет использовано в виде (4.3), где произведение первых трех множителей для диафрагмы данной установки будет представлено числом:

$$G_{ВВ} = 71 \cdot 10^{-6} \cdot \sqrt{2\rho_2 \Delta p}, \quad (4.6)$$

Определение плотности влажного воздуха выполняется по уравнению состояния идеального газа:

$$\rho_2 = \frac{1}{v_2} = \frac{p_2}{R_{\text{ВВ}} T_2}, \quad (4.7)$$

где p_2 - давление воздуха перед диафрагмой принимается равным давлению атмосферного воздуха В, определенному по лабораторному барометру и выраженному в Па,

T_2 – температура воздуха перед диафрагмой в К,

$R_{\text{ВВ}}$ – газовая постоянная влажного воздуха определяется при его молекулярной массе $\mu_{\text{ВВ}}$.

$$\mu_{\text{ВВ}} = 28,96 - 10,944 \frac{p_{\text{п2}}}{p_2}, \quad (4.8)$$

где $p_{\text{п2}}$ – парциальное давление водяных паров в воздухе за калорифером (определяется по Н,d – диаграмме).

Расчет перепада давления на диафрагме определяется по показаниям манометра при плотности воды в нем $\rho_{\text{H}_2\text{O}} = 1000 \text{ кг/м}^3$:

$$\Delta p = \rho_{\text{H}_2\text{O}} g \Delta h, \quad (4.9)$$

где Δh – разница уровней воды в U образном манометре в м,
 g – ускорение свободного падения $9,81 \text{ м/с}^2$.

Расход сухого воздуха, проходящего через установку, определяется вычитанием из расхода влажного воздуха содержания водяного пара в нем, что соответствует выражению:

$$G = \frac{G_{\text{ВВ}}}{1 + 0,001 d_1}, \quad (4.10)$$

где d_1 – влагосодержание водяных паров в воздухе за калорифером в г/(кг с. в.) определяется по Н,d – диаграмме.

3.2 Построение процесса в Н,d - диаграмме

Процесс 1-2 нагрева воздуха в калорифере (рисунок 4.5) установки строится по показаниям лабораторного психрометра t_o и $t_{\text{ом}}$ и показаниям термопар на входе t_1 и выходе t_2 из калорифера.

По показаниям лабораторного психрометра t_o и $t_{\text{ом}}$ по диаграмме Н,d определяется влагосодержание воздуха на входе в установку d_1 . По этому влагосодержанию и показаниям термопар на входе t_1 и выходе t_2 из калорифера строится процесс нагрева воздуха в калорифере, он идет при $d_1 = \text{const}$, так как в калорифере воздух не контактирует с объектами, содержащими воду.

По показаниям термопар сухой t_3 и мокрой t_4 определяется точка 3 на Н,d – диаграмме, соответствующая состоянию воздуха на выходе из калорифера. Для

всех трех точек процесса 1-2-3 по H, d – диаграмме определяются следующие величины:

- d – влагосодержание,
- p_n – парциальное давление водяного пара в воздухе,
- t_p – температура точки росы,
- φ – относительная влажность,
- H – энтальпия влажного воздуха.

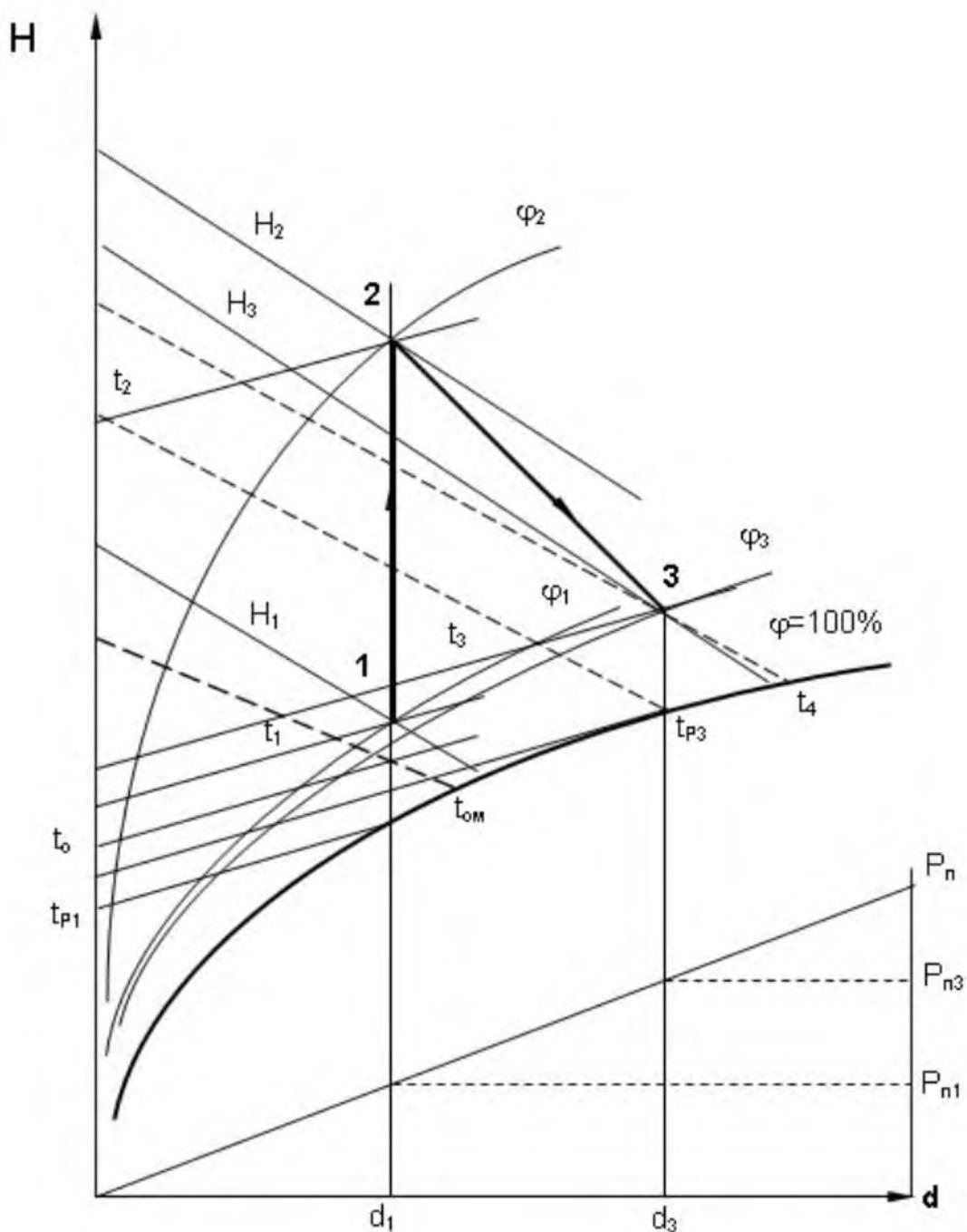


Рисунок 4.5 - Процесс влажного воздуха в калорифере и сушильной камере лабораторной установки в диаграмме H, d

Величину абсолютной влажности воздуха $\rho_{вв}$ в этих точках по диаграмме

H, d определить нельзя, поэтому ее определяют по таблицам термодинамических свойств воды и водяного пара, как функцию от температуры и парциального давления водяного пара. Правильность определения абсолютной влажности воздуха проверяют, используя уравнение состояния идеального газа, применительно к водяному пару во влажном воздухе:

$$\rho_{\text{ВВ}} = \frac{1}{v_{\text{H}_2\text{O}}} = \frac{p_{\text{П}}}{R_{\text{H}_2\text{O}} T}. \quad (4.11)$$

Результаты определения основных характеристик точек процесса 1-2-3 записывают в сводную таблицу 4.2.

Таблица 4.2 – Результаты расчета точек процесса

Точка	$t, ^\circ\text{C}$	$d,$ г/(кг с.в.)	$t_p, ^\circ\text{C}$	$P_{\text{п}},$ мм рт.ст.	φ	$H,$ кДж/(кг с.в.)	$\rho_{\text{ВВ}}, \text{кг/м}^3$
1							
2							
3							

3.3 Определение потерь теплоты в калорифере и сушильной камере

Определение потерь теплоты в калорифере ведется сравнением теплоты, выделенной электрическим нагревателем калорифера, и теплоты воспринятой воздухом в калорифере. Теплота, выделенная электрическим нагревателем калорифера, рассчитывается по формуле:

$$Q_{\text{к}} = U_{\text{н}} I, \quad (4.12)$$

где $U_{\text{н}}$ – напряжение на электрическом нагревателе в В,

I – ток на электрическом нагревателе в А, который определяется по $R_0=0,1$ Ом - образцовому сопротивлению последовательно включенному в цепь с нагревателем, как $I=U_0/R_0$.

Теплота, воспринятая воздухом в калорифере, рассчитывается по выражению, кВт:

$$Q_{\text{в}} = G(H_2 - H_1), \quad (4.13)$$

где H_1 и H_2 – энтальпии влажного воздуха на входе и выходе в калорифер в кДж/(кг с.в.).

Потери теплоты в калорифере во внешнюю среду определяются как разность $Q_{\text{пот}}^{\text{к}} = Q_{\text{к}} - Q_{\text{в}}$.

Потери теплоты в сушильной камере определяются путем сопоставления реального процесса сушки 2-3 с идеальным процессом сушки без потерь теплоты во внешнюю среду, который идет по постоянной энтальпии $H_2 = \text{const}$.

Расчетное выражение потерь теплоты в сушильной камере во внешнюю среду выполняется по формуле, кВт:

$$Q_{\text{пот}}^{\text{ск}} = G(H_2 - H_3). \quad (4.14)$$

где H_2 и H_3 – энтальпии влажного воздуха на входе и выходе из сушильной камеры соответственно в кДж/(кг с.в.).

Общие потери теплоты в установке соответствуют сумме:

$$Q_{\text{пот}}^{\text{общес}} = Q_{\text{пот}}^{\text{к}} + Q_{\text{пот}}^{\text{ск}} \quad (4.15)$$

3.4 Определение количества теплоты, необходимой для испарения 1 кг воды в установке

Для определения количества теплоты необходимого для испарения 1 кг влаги в данной установке сначала рассчитывается количество сухого воздуха необходимого для испарения 1 кг воды по формуле, (кг с.в.)/(кг исп. вл.):

$$G_{\text{св}} = \frac{1000}{d_3 - d_1}. \quad (4.16)$$

Здесь разность влажностей $d_3 - d_1$ показывает количество водяного пара, испаренного с 1 кг сухого воздуха в г.

Количество теплоты, затраченной в калорифере на нагрев воздуха для испарения 1 кг воды будет соответствовать выражению, кДж/кг исп. вл.:

$$Q = G_{\text{св}}(H_2 - H_1). \quad (4.17)$$

Действительное количество теплоты, затраченное в установке, для испарения 1 кг воды будет соответствовать выражению, кДж/кг исп. вл.:

$$Q_{\text{д}} = \frac{Q_{\text{к}}}{G(d_3 - d_1)}. \quad (4.18)$$

Здесь $Q_{\text{к}}$ в Вт, G в кг/с, d_1 и d_3 в г/(кг с.в.).

Результаты расчетов сводятся в таблицу 4.3.

Таблица 4.3 – Результаты расчета процессов в сушильной установке

Q_k	Q_v	$Q_{пот}^k$	$Q_{пот}^{ск}$	$Q_{пот}^{общее}$	$G_{св}$	Q	Q_d
кВт	кВт	кВт	кВт	кВт	$\frac{кг}{кг\text{ исп.вл.}}$	$\frac{кДж}{кг\text{ исп.вл.}}$	$\frac{кДж}{кг\text{ исп.вл.}}$

Результаты расчета процессов в сушильной установке анализируются на основании данных таблиц 4.2 и 4.3.

По результатам этого анализа делаются краткие выводы об эффективности работы данной установки и ее недостатках.

4 Контрольные вопросы

1. Что называют насыщенным влажным воздухом?
2. Что называют насыщенным, ненасыщенным и сухим насыщенным паром?
3. Сформулировать закон Дальтона применительно к влажному воздуху.
4. Объяснить, почему $p_n < p_n^*$?
5. Что называется температурой точки росы, абсолютной и относительной влажностью, влагосодержанием влажного воздуха?
6. Как определяются параметры влажного воздуха (h , T_p , d , p_r , ϕ) по h - d диаграмме?
7. Описать h - d диаграмму влажного воздуха. Какие линии изображены на диаграмме?
8. Как протекает процесс сушки в реальной и идеальной сушильной камере?

Лабораторная работа № 5

Исследование теплопередачи в рекуперативном теплообменном аппарате

Цель работы: Определить коэффициент теплопередачи в рекуперативном теплообменном аппарате типа «труба в трубе».

Задачи работы:

- экспериментально найти коэффициент теплопередачи в рекуперативном теплообменном аппарате типа «труба в трубе»;
- рассчитать коэффициент теплопередачи, используя критериальные формулы для определения коэффициентов теплоотдачи от теплоносителей к стенкам теплообменного аппарата;
- сравнить экспериментальное и расчетные значения коэффициента теплопередачи в теплообменнике типа «труба в трубе».

1 Теоретическое введение

Процесс передачи тепла между двумя теплоносителями, имеющими различные температуры, осуществляется в аппаратах различных конструкций, называемых теплообменниками. Одной из таких конструкций является теплообменник «труба в трубе», представляющий собой систему двух коаксиальных труб разных диаметров. По внутренней трубе проходит один теплоноситель, по кольцевому зазору между трубами – второй. Поток тепла при этом направлен поперек цилиндрической поверхности внутренней трубы.

Количество передаваемого в теплообменнике тепла в случае установившегося процесса можно определить из уравнения теплопередачи:

$$Q=K \cdot F \cdot \Delta t_{cp}, \quad (5.1)$$

где F – теплопередающая поверхность, м²;

Δt_{cp} – средний температурный напор, °С;

K – коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·К).

Средний температурный напор – это разность между температурами горячего и холодного теплоносителей, усредненная вдоль теплопередающей поверхности.

Усреднение требуется в тех случаях, когда температура хотя бы одного теплоносителя изменяется при прохождении его через теплообменник. Независимо от взаимного направления движения теплоносителей Δt_{CP} можно рассчитать по формуле:

$$\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_6 - \Delta t_M}{2,3 \cdot \lg \left(\frac{\Delta t_6}{\Delta t_M} \right)}, \quad (5.2)$$

где $\Delta t_6, \Delta t_M$ – большая и меньшая разности температур между теплоносителями на концах теплообменника.

Если $0,5 \leq \frac{\Delta t_6}{\Delta t_M} \leq 2,0$, то с достаточной точностью Δt_{cp} можно рассчитать:

$$\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_6 - \Delta t_M}{2}. \quad (5.3)$$

Коэффициент теплопередачи K по физическому смыслу является термической проводимостью того пути, по которому тепло передается от горячего теплоносителя к холодному. Вдоль этого пути обычно выделяются следующие термические сопротивления:

1. Сопротивление при переходе тепла от основной массы (потока) первого теплоносителя к поверхности трубы ($1/\alpha_r$, где α_r – коэффициент теплоотдачи или термическая проводимость ламинарного пристенного слоя);
2. Термическое сопротивление слоя загрязнений на стенках трубы (накипь, ржавчина);
3. Термическое сопротивление собственной стенки трубы ($\delta_{ст}/\lambda_{ст}$, $\delta_{ст}$ – толщина стенки, $\lambda_{ст}$ – коэффициент теплопроводности материала трубы)
4. Термическое сопротивление загрязнений на стенках трубы со стороны второго теплоносителя;
5. Термическое сопротивление ламинарного слоя при переходе тепла от наружной стенки трубы к основной массе второго теплоносителя ($1/\alpha_x$).

Так как перечисленные сопротивления проходятся тепловым потоком последовательно, то общее термическое сопротивление системы равно, сумме отдельных сопротивлений, а проводимость есть величина, обратная сопротивлению:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_r} + \sum r_{ст} + \frac{1}{\alpha_x}}, \quad (5.4)$$

$$\sum r_{ст} = \frac{\delta}{\lambda} + r_{зг} + r_{зх}. \quad (5.5)$$

Определение коэффициентов теплоотдачи является одной из основных задач теории теплообмена. Коэффициенты теплоотдачи рассчитываются из критериальных соотношений, в которых сам вид обобщенных безразмерных переменных (критериев подобия) определяется теоретически на основе теории подобия,

а явный вид зависимости между критериями находится экспериментально для каждого вида теплообмена.

Коэффициент теплоотдачи α входит в определяемый критерий Нуссельта, характеризующий интенсивность перехода тепла на границе потока - стенки:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda}. \quad (5.6)$$

Определяемый критерий Nu , в свою очередь, является функцией следующих определяющих критериев:

$$Nu = f(Re, Pr, Gr), \quad (5.7)$$

$$Pr = \frac{c_p \cdot \mu}{a}, \quad (5.8)$$

$$Re = \frac{\omega \cdot l \cdot \rho}{\mu} = \frac{\omega \cdot l}{\nu}, \quad (5.9)$$

$$Gr = \frac{g \cdot l^3 \cdot \beta \cdot \Delta t}{\nu^2} = \frac{g \cdot l^3 \cdot \rho^2 \cdot \beta \cdot \Delta t}{\mu^2}, \quad (5.10)$$

где Pr – критерий Прандтля (характеризует отношение вязкостных и теплопроводных свойств теплоносителя);

Re – критерий Рейнольдса (характеризует соотношение сил инерции и молекулярного трения в потоке);

Gr – критерий Грасгофа (характеризует соотношение сил трения и подъемной силы, обусловленной различием плотностей в отдельных точках неизотермического потока);

c_p – удельная изобарная теплоемкость, Дж/кг·К;

l – определяющий геометрический размер, м (в работе – это диаметр внутренней трубы или эквивалентный диаметр кольцевого пространства);

μ, ν – динамический (Па·с) и кинематический (m^2/s) коэффициент вязкости;

a, λ – коэффициенты теплопроводности (m^2/s) и теплопроводности (Вт/м·К).

Вид критериального соотношения для расчета коэффициентов теплоотдачи определяется экспериментально для каждого конкретного случая. Так, при движении потоков в прямых трубах и каналах он зависит от режима течения жидкости (газа);

- при развитом турбулентном течении ($Re \geq 10000$):

$$Nu = 0,021 \cdot \varepsilon_1 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_{ст}} \right)^{1,25}, \quad (5.11)$$

где ε_1 - поправочный коэффициент, учитывающий влияние на коэффициент теплопередачи отношения длины трубы L к ее диаметру d ($\varepsilon_1=1$ при $L/d>50$).

- в переходной области ($2300 \leq Re < 10000$) точных зависимостей не имеется. Для практических расчетов рекомендуется приближенное уравнение:

$$Nu = 0,008 \cdot \varepsilon_1 \cdot Re^{0,9} \cdot Pr^{0,43}, \quad (5.12)$$

- при ламинарном режиме движения теплоносителя между двумя трубами, расположенными концентрически, критериальное уравнение для расчета теплообмена с поверхностью внутренней трубы имеет вид:

$$Nu = 0,023 \cdot \left(\frac{D}{d}\right)^{0,45} \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4}. \quad (5.13)$$

При ламинарном режиме для труб с соотношением $L/d > 50$, $\varepsilon_1 \approx 1$. Множитель $(Pr/Pr_{ст})$ учитывает направление теплового потока и близок к единице, когда температуры жидкости и стенки не сильно отличаются. При расчетах критериев за определяющую температуру принимается средняя температура потока, а за определяющий размер l – эквивалентный диаметр d_3 .

2 Лабораторная установка

Работа выполняется на виртуальной лабораторной установке в моделирующей программе на компьютере. Лабораторная установка представляет собой теплообменник типа "труба в трубе" с противоточным движением теплоносителей (рисунок 5.1).



Рисунок 5.1 – Лабораторная установка

На входе в аппарат и выходе из него установлены температурные датчики, соединенные с цифровыми приборами, показывающими температуры горячей начальной $T_{1н}$, холодной начальной $T_{2н}$ (постоянно $10\text{ }^{\circ}\text{C}$), горячей конечной $T_{1к}$, холодной конечной $T_{2к}$ воды. Измерение расходов горячей G_1 и холодной G_2 воды производится расходомерами, а регулировка расходов - с помощью вентилей К1 и К2. Длина наружной (кожуховой) трубы $l=1,5$ м с наружным диаметром $D=30$ мм, внутренний диаметр $d=26$ мм. Внутренняя (теплообменная) труба наружный диаметр $D=20$ мм, внутренний диаметр $d=16$ мм.

3 Выполнение работы

Порядок действий при выполнении работы:

1. Включить нагреватель теплоносителя.
2. Установить температуру горячего теплоносителя, повернув регулятор.
3. Открыть кран с холодной водой.
4. Открыть кран с горячей водой.
5. Зафиксировать расходы холодной и горячей воды.
6. На таймере нажать "старт" и фиксировать изменения температур горячей и холодной воды.
7. Зафиксировать время до стабилизации температур холодной и горячей воды и нажать на таймере "стоп".
8. Для регистрации данных с другими исходными данными повторить пункты 2 - 7.
9. Рассчитать коэффициент теплопередачи, используя критериальные формулы для определения коэффициентов теплоотдачи от теплоносителей к стенкам теплообменного аппарата.
10. Сравнить экспериментальное и расчетное значения коэффициента теплопередачи в теплообменнике типа «труба в трубе».
11. Сделать вывод к работе.

Показатели приборов и результаты обработки данных заносятся в таблицу отчета (таблица 5.1).

Тепловой поток (тепловая мощность) рассчитывается для горячей и холодной воды по формулам:

$$Q_1 = c_{ГВ} \cdot (t_{1к} - t_{1н}), \quad (5.14)$$

$$Q_2 = c_{ХВ} \cdot (t_{2к} - t_{2н}), \quad (5.15)$$

где $c_{ХВ}$, $c_{ГВ}$ – теплоемкость холодной и горячей воды при средних температурах в теплообменном аппарате, $^{\circ}\text{C}$.

Таблица 5.1 – Журнал наблюдений

№	Температура, °С			Расход, л/мин		Тепловой поток, кВт	
	$T_{1н}$	$T_{1к}$	$T_{2к}$	G_1	G_2	Q_1	Q_2
1							
2							
3							
4							
5							

Тепловой поток Q_1 показывает количество теплоты, отдаваемое от горячей воды к холодной. Тепловой поток Q_2 отображает количество теплоты, принимаемое холодной водой от горячей. Сравнение потоков Q_1 и Q_2 позволяет оценить правильность работы программы, так как должно соблюдаться равенство $Q_1=Q_2$.

Коэффициент теплопроводности материалов труб подбирается по Приложению Г.

4 Контрольные вопросы

1. Что называется теплопередачей?
2. Какие законы теплопередачи положены в основу определения коэффициента теплопередачи? Дать их формулировки.
3. Что характеризует коэффициент теплоотдачи?
4. Что называется степенью черноты тела?
5. Что характеризует собой свободная и вынужденная конвекция?
6. Как подсчитывается тепловой поток между двумя телами, обменивающимися лучистой энергией?

Лабораторная работа № 6 (дополнительно)

Определение теплопроводности материалов методом пластины

Цель работы: Ознакомление со стационарным методом определения коэффициентов теплопроводности материалов и проведение измерений на автоматизированном учебном лабораторном стенде; экспериментальное определение коэффициента теплопроводности различных плоских материалов с использованием компьютерных технологий.

Задачи работы:

- найти значение коэффициента теплопроводности исследуемого материала для трех-четырёх различных режимов (по мощности нагревателя);
- построить график зависимости коэффициента теплопроводности от температуры материала.

1 Теоретическое введение

Стационарные методы измерения теплопроводности, простейшие по теоретическому обоснованию, начали развиваться раньше других методов и в настоящее время достигли значительного совершенства за счет использования современных средств контроля и измерения. С их помощью исследуются самые различные материалы: металлы, полупроводники, теплоизоляторы, волокна, порошки, жидкости и газы. Для изучения теплопроводности твердых материалов, с высоким и низким значением λ , неметаллических жидкостей и газов применяются, в основном, методы, в которых испытуемый образец имеет форму пластины, трубы или полого шара и обеспечиваются условия для протекания через образец одномерного теплового потока.

Теплопроводностью называется процесс передачи теплоты, обусловленный тепловым движением микрочастиц. В газах и жидкостях перенос теплоты теплопроводностью осуществляется посредством диффузии атомов и молекул. В твердых телах свободное движение атомов и молекул по всему объёму вещества невозможно и сводится только к их колебательному движению относительно определенных положений равновесия. Поэтому процесс теплопроводности в твердых телах обусловлен возрастанием амплитуды этих колебаний, распространяемым в объёме тела за счёт возмущения силовых полей между колеблющимися частицами. В металлах перенос теплоты теплопроводностью происходит не только за счет колебаний ионов и атомов, находящихся в узлах кристаллической решетки, но и за счет движения свободных электронов, образующих так называемый «электронный газ». В связи с наличием в металлах дополнительных носителей тепловой энергии в виде свободных электронов теплопроводность металлов существенно выше, чем твердых диэлектриков.

Рассмотрим плоскопараллельную пластину, через которую проходит одномерный тепловой поток с линиями тока, перпендикулярными к её поверхности. Тепловой поток через такую стенку определяется согласно закону Фурье:

$$\Phi = -\lambda \frac{T_1 - T_2}{\delta} F, \quad (6.1)$$

где λ - коэффициент теплопроводности материала пластины, Вт/(м·К);

T_1, T_2 - средние температуры наружной и внутренней поверхностей пластины, К;

δ - толщина пластины, м;

F - площадь поверхности пластины, м².

Формула (6.1) применяется в том случае, если коэффициент λ принимается постоянным, не зависящим от температуры, что справедливо при малых перепадах температуры. В общем случае следует учитывать температурную зависимость коэффициента теплопроводности материала.

При использовании образцов конечных размеров часть теплового потока, проходящего через образец, рассеивается во внешнюю среду – это требуется учитывать в эксперименте. Если образцы изготовлены из воздушно-пористых материалов малой плотности, или исследуются газы или жидкости, то влиянием контактных сопротивлений можно пренебречь.

Существуют три различных по своей природе вида переноса теплоты: теплопроводность, конвекция и излучение. Теплопроводность представляет собой молекулярный перенос теплоты в сплошной среде, обусловленный наличием градиента температуры. Теплопроводность в чистом виде, как правило, встречается только в твердых телах за счет непосредственного соприкосновения частиц, имеющих различную температуру, что приводит к обмену энергией между атомами, молекулами или свободными электронами. Процесс теплопроводности связан с распределением температуры в пространстве и времени.

Совокупность значений температуры во всех точках тела и или пространства в некоторый момент времени называется температурным полем.

Температурное поле может быть нестационарным (изменяющимся во времени) и стационарным (не изменяющимся во времени). В зависимости от распределения температуры по направлениям различают одно-, двух- или трехмерные температурные поля.

Совокупности точек, имеющих одинаковую температуру, образуют изотермические поверхности внутри тела. Такие поверхности не пересекаются между собой и могут быть либо замкнутыми, либо заканчиваются на поверхности тела. Изменение температуры в теле наблюдается только в направлениях, пересекающих изотермические поверхности. При этом наибольшее изменение температуры происходит в направлении нормали к изотермическим поверхностям.

Предел отношения изменения температуры ΔT к расстоянию Δn по нормали n между изотермическими поверхностями называется градиентом температуры (рисунок 6.1), К/м:

$$\lim_{\Delta n \rightarrow 0} \frac{\Delta T}{\Delta n} = \frac{\partial T}{\partial n} = \text{grad} T. \quad (6.2)$$

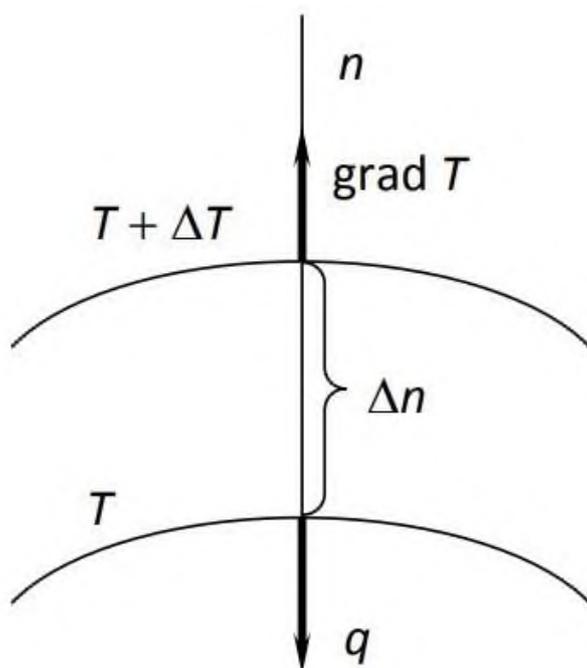


Рисунок 6.1 – Схема к определению градиента температуры

Температурный градиент это вектор, направленный в сторону возрастания температуры.

Температурный градиент характеризует скорость изменения температуры в направлении по нормали к изотермической поверхности. Процесс теплопроводности характеризует основной закон теплопроводности – закон Фурье (1822 г.). Согласно этому закону плотность теплового потока, передаваемого посредством теплопроводности, прямо пропорциональна температурному градиенту:

$$q = -\lambda \cdot \text{grad}(T), \quad (6.3)$$

где λ - коэффициент теплопроводности вещества, Вт/(м·К).

Знак (-) показывает, что тепловой поток и температурный градиент противоположны по направлению.

Коэффициент теплопроводности показывает какое количество теплоты передается в единицу времени через единицу поверхности при температурном градиенте равном единице.

Коэффициент теплопроводности является важной теплофизической харак-

теристикой материала и знание его необходимо при выполнении тепловых расчетов, связанных с определением тепловых потерь через ограждающие конструкции зданий и сооружений, стенки машин и аппаратов, расчете тепловой изоляции, а также при решении множества других инженерных задач.

Коэффициент теплопроводности зависит от физической природы вещества, его температуры, давления, структуры, плотности, влажности и определяется экспериментально. Коэффициент теплопроводности различных веществ изменяется в широких пределах:

- для металлов и сплавов $2 \leq \lambda \leq 450$ Вт/(м·К) (для большинства чистых металлов с повышением температуры коэффициент теплопроводности уменьшается);

- для газов $0,006 \leq \lambda \leq 0,1$ Вт/(м·К), причем с повышением температуры коэффициент теплопроводности возрастает;

- для жидкостей $0,1 \leq \lambda \leq 0,7$ Вт/(м·К) (при повышении температуры коэффициент теплопроводности, как правило, уменьшается);

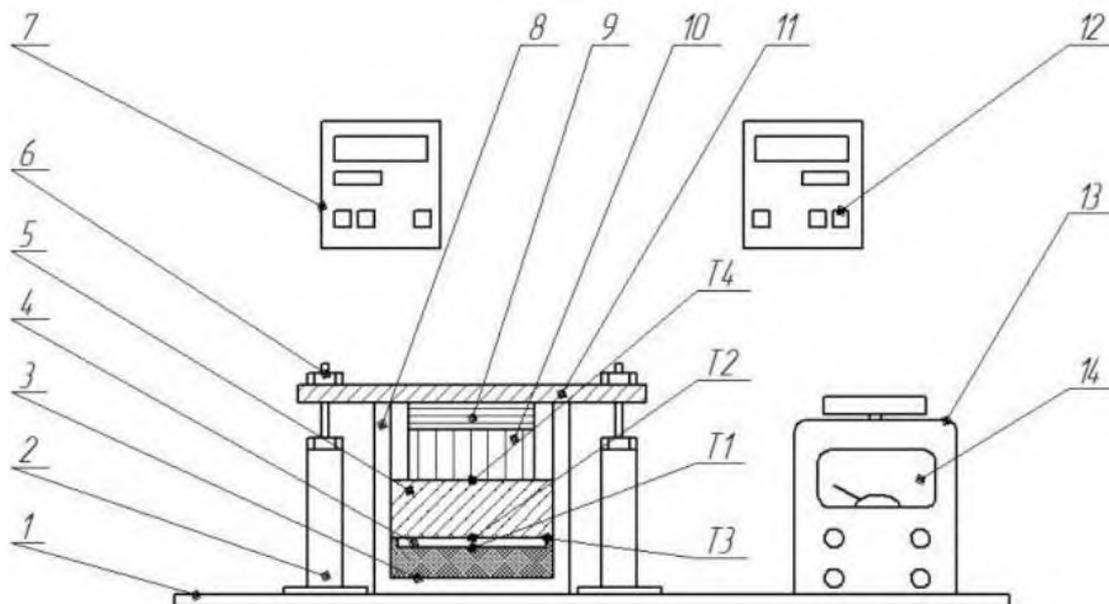
- для большинства строительных неметаллических материалов $0,023 \leq \lambda \leq 2,9$ Вт/(м·К) (материалы, у которых $\lambda < 0,25$ Вт/(м·К), называются теплоизоляционными, с повышением температуры коэффициент теплопроводности этих материалов обычно возрастает).

В настоящей работе экспериментально определяется коэффициент теплопроводности материалов при стационарном тепловом режиме, контролируемым с помощью компьютера.

2 Выполнение работы

Используемая в эксперименте установка (рисунок 6.2) состоит из основания (1), монтажных стоек (2), удерживающими прижимной механизм (6, 11) охладителя (8, 9). Нагреватель (4), установленный на пенопластовой основе (3) подключается к автоматическому трансформатору (13). К нагревателю сверху плотно прижимается испытуемый образец (5) диаметром 120 мм и толщиной 35 мм. Вся система смонтирована в корпусе с полостями (8), из которых выкачан воздух. Термопара Т1 закреплена на корпусе нагревателя сверху, Т2 –снизу на образце, Т3 – со стороны нагревателя у боковой стенки образца, Т4 –в центре с холодной стороны образца. Температуры Т1 и Т2 выводятся на измеритель ТРМ 200, расположенный слева (7) (Т1 - красный дисплей, Т2 - зеленый), а температуры Т3 и Т4 соответственно на измерителе справа (12) (Т3 - красный дисплей, Т4 - зеленый). Напряжение на автотрансформаторе (ЛАТР) отображается на его стрелочном приборе, а также может фиксироваться мультиметром. Напряжение нагревателя регулируется автотрансформатором, ограниченным диапазоном регулирования до 50 В. В процессе регулирования к клеммам «выход» подключа-

ется мультиметр для более точной фиксации напряжения подаваемого на нагреватель. Сигналы с термопар в режиме реального времени отображаются на измерителях ТРМ 200.



- 1 – основание, 2 – стойка монтажная, 3 – нижняя прослойка пенопласта,
 4 - нагреватель, 5 – испытываемый образец, 6 – прижимные гайки,
 7, 12 – измерители ТРМ 200, 8 – теплоизолирующий кожух, 9 – вентилятор,
 10 – радиатор, прижимная пластина, 13 – ЛАТР, 14 – измеритель напряжения

Рисунок 6.2 – Схема экспериментальной установки

Описание алгоритма выполнения работы на лабораторном стенде, подключенном к компьютеру:

1. Ознакомиться с устройством и работой лабораторной установки.
2. Включить компьютер (ноутбук) в сеть, подключить с помощью фишки USB измерительную систему стенда к компьютеру.
3. Включить сеть на приборной доске и выключатели ВК1 и ВК2
4. Вывести на экран лицевую панель лабораторной работы «Теплопроводность изоляционных материалов» (рисунок 6.3), нажав на соответствующую иконку MeasLAB→«Теплопроводность».
5. Изменить COM. ПОРТ с 5 на 3 и запустить режим измерения кнопкой «Пуск». При этом загорится зелёный огонёк «плата подключена».
6. Включить ЛАТР, установив мощность 100 Вт.
7. Наблюдать в течение 600 секунд изменения показаний датчиков температуры T1 – T4 на цифровых индикаторах и многоканальном осциллографе на лицевой панели компьютерной системы измерения, после чего записать данные в табл.1.
8. Установить последовательно мощность ЛАТР равную 250 Вт, затем

500 Вт и повторить пункт 7, выполнив замеры температур через 600,1300 и 2100 секунд соответственно.

9. Произвести вычисления согласно разделу «Обработка экспериментальных данных».

10. Построить график $\lambda=f(T_{cp})$ для трех режимов (T_{cp} - средняя температура образца на каждом режиме, К).

11. Определить по таблицам теплопроводности материал исследуемого образца.

12. Ответить на контрольные вопросы и сделать выводы по лабораторной работе.

Данный алгоритм применим только к выполнению работы на действительном рабочем стенде. При виртуальном выполнении лабораторной работы осуществляется мысленный подбор числовых значений температур T_1 - T_4 и значений мощности нагревательного элемента (значения мощности могут приниматься другими). Следует придерживаться закономерности плавного роста теплопроводности исследуемого материала до определенного значения. Все пределы значений обговариваются группой студентов под руководством преподавателя. Так как значения принимаются произвольно, то получаемый коэффициент теплопроводности λ может не соответствовать ни одному из реальных материалов, что не требует перерасчетов. Однако, преподавателем изначально может быть поставлена цель перед студентами подобрать такие значения температур, чтобы при перерасчете была получена зависимость показателя λ действительного материала (например, стали определенной марки).

3 Обработка экспериментальных данных

1. Определить площадь поверхности образца $F=\pi d^2/4$, м².

2. Определить коэффициент формы образца, м⁻¹:

$$C=\frac{\delta}{F}, \quad (6.5)$$

где δ – толщина образца, м

3. Тепловой поток от нагревателя, Вт:

$$\Phi=\frac{U^2}{R}, \quad (6.6)$$

где U – напряжение, подаваемое на нагреватель определяется по показаниям вольтметра, установленного в ЛАТР, В

R – величина сопротивления нагревателя, $R=3,0$ Ом

4. Вычислить среднюю температуру нижней поверхности образца для трёх режимов $T_{\text{ср.н.п.}}=0,5 \cdot (T_2+T_3)$, К.

5. Для каждого из трёх режимов рассчитать коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К):

$$\lambda = C \frac{\Phi}{T_{\text{ср.н.п.}} - T_4}, \quad (6.7)$$

где T_4 - температура холодной поверхности образца, К.

6. Вычислить среднюю температуру образца $T_{\text{ср}}=(T_4+T_{\text{ср.н.п.}})/2$.

7. Построить график зависимости $\lambda=f(T_{\text{ср}})$.

Результаты обработки результатов записать в таблицу 6.1.

Таблица 6.1 – Результаты расчетов и наблюдений

№ п/п	P, Вт	τ , с	t_1 , °С	T_1 , К	t_2 , °С	T_2 , К	t_3 , °С	T_3 , К	t_4 , °С	T_4 , К	λ , $\frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$
1											
2											
3											

4 Контрольные вопросы

1. Назовите все виды переноса теплоты и дайте их определение.
2. Что называется температурным полем? Напишите его уравнение.
3. Что называется одно-, двух- и трехмерным температурным полем? Напишите их уравнения.
4. Что такое изотермическая поверхность? Какой вид имеют изотермические поверхности в теплоизоляционном слое при стационарном режиме?
5. Что называется градиентом температуры?
6. Сформулируйте закон Фурье.
7. Что называется коэффициентом теплопроводности?
8. Какие факторы влияют на величину коэффициента теплопроводности? Опишите особенности теплопроводности различных веществ.
9. Сформулируйте граничные условия первого рода.
10. Вывести уравнение теплопроводности через плоскую и цилиндрическую стенки.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Средняя теплоемкость воздуха в интервале температур от 0 до 100, °С

$t, ^\circ\text{C}$	Массовая, кДж/(кг·К)		Объемная, кДж/(м ³ ·К)		Молярная, кДж/(кмоль·К)	
	c_{pm}	c_{vm}	c'_{pm}	c'_{vm}	μc_{pm}	μc_{vm}
0	1,0036	0,7164	1,2971	0,9261	29,073	20,758
5	1,0037	0,7165	1,2973	0,9263	29,077	20,762
10	1,0038	0,7167	1,2975	0,9264	29,081	20,766
15	1,0040	0,7168	1,2976	0,9266	29,084	20,770
20	1,0041	0,7170	1,2978	0,9267	29,088	20,774
25	1,0042	0,7171	1,2980	0,9269	29,092	20,778
30	1,0043	0,7173	1,2982	0,9270	29,096	20,782
35	1,0044	0,7174	1,2983	0,9271	29,100	20,786
40	1,0045	0,7176	1,2985	0,9273	29,105	20,790
45	1,0047	0,7177	1,2986	0,9274	29,109	20,794
50	1,0048	0,7179	1,2988	0,9275	29,113	20,798
55	1,0049	0,7180	1,2990	0,9277	29,117	20,802
60	1,0051	0,7182	1,2991	0,9279	29,121	20,806
65	1,0052	0,7183	1,2993	0,9280	29,124	20,810
70	1,0054	0,7185	1,2994	0,9282	29,128	20,814
75	1,0055	0,7186	1,2996	0,9284	29,132	20,818
80	1,0056	0,7187	1,2998	0,9286	29,136	20,822
85	1,0057	0,7189	1,2999	0,9289	29,140	20,826
90	1,0059	0,7190	1,3001	0,9291	29,144	20,830
95	1,0060	0,7192	1,3002	0,9294	29,148	20,834
100	1,0061	0,7193	1,3004	0,9296	29,152	20,838

Физические параметры сухого воздуха при $p=101332$ Па

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$\lambda \cdot 10^2, \text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$	$\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	$a \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	Pr
0	1,293	2,44	13,28	18,8	0,707
10	1,247	2,51	14,16	20,0	0,705
20	1,205	2,59	15,06	21,4	0,703
30	1,165	2,67	16,00	22,9	0,701
40	1,128	2,76	16,96	24,3	0,699
50	1,093	2,83	17,95	25,7	0,698
60	1,060	2,90	18,97	27,2	0,696
70	1,029	2,96	20,02	28,6	0,694
80	1,000	3,05	21,09	30,2	0,692
90	0,972	3,13	22,10	31,9	0,690
100	0,946	3,21	23,13	33,6	0,688
120	0,898	3,34	25,45	36,8	0,686
140	0,854	3,49	27,80	40,3	0,684
160	0,815	3,64	30,09	43,9	0,682
180	0,779	3,78	32,49	47,5	0,681
200	0,746	3,93	34,85	51,4	0,680

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Психрометрическая таблица

Темпер. «мокрого» терм., °С	Разность показаний «сухого» и «мокрого» термометров, °С																
	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9
5	79	69	60	51	43	35											
6	80	70	61	53	45	38	31										
7	81	72	63	55	48	41	35	28									
8	81	73	65	57	50	43	37	31									
9	82	74	66	59	52	46	40	34	29								
10	83	75	68	61	54	48	42	37	32	27							
11	84	76	69	63	56	48	45	39	34	29							
12	84	77	70	64	58	52	47	40	37	32	28						
13	85	78	72	65	60	54	49	44	39	35	30						
14		79	73	67	61	56	51	46	41	37	33	29					
15		80	74	68	63	57	53	48	43	39	35	32	28				
16		81	75	69	64	59	54	50	45	41	37	34	30				
17		81	76	70	65	60	56	51	47	43	40	36	33	29			
18		82	76	71	66	62	57	53	49	45	41	38	35	32	29		
19		83	77	72	67	63	59	54	51	47	43	40	37	34	31	28	
20		83	78	73	68	64	60	56	52	48	45	42	38	35	33	30	27
21		84	79	74	69	65	61	57	53	50	46	43	40	37	35	32	29
22		84	79	75	70	66	62	58	55	51	48	45	42	39	36	34	31
23		85	80	76	71	67	63	59	56	53	49	46	43	41	38	35	33
24		85	81	76	72	68	64	61	57	54	51	48	45	42	40	37	35
25			81	77	73	69	65	62	58	55	52	49	46	44	41	38	36
26			82	78	74	70	66	63	59	56	53	50	47	45	42	40	38
27			82	78	74	71	66	64	60	57	56	52	49	46	44	41	39
28			83	79	75	71	69	65	61	58	56	53	50	48	45	43	40
29			83	79	76	72	69	65	62	59	57	54	51	49	46	44	42
30			83	80	76	73	71	66	63	60	58	55	52	50	47	45	43
31			84	80	77	73	71	67	64	61	58	56	53	51	48	46	44
32			84	81	77	74	71	68	65	62	59	57	54	52	49	47	45
33			85	81	78	74	71	68	65	63	60	58	55	53	50	48	46
34			85	81	78	75	72	69	66	64	61	58	56	54	51	49	47
35			85	82	79	76	73	70	67	64	62	59	57	55	52	50	48
36				82	79	76	73	70	68	65	62	60	58	55	53	51	49
37				83	79	76	74	71	68	66	63	61	58	56	54		
38				83	80	77	74	71	69	66	64	61	59				
39				83	80	77	75	72	69	67	64						
40				84	81	78	75	72	70								

ПРИЛОЖЕНИЕ В
Степень черноты полного нормального излучения для
различных материалов

Наименование материала	t, °С	ε
Алюминий полированный	50...500	0,04...0,06
Алюминий шероховатый	20...50	0,06...0,07
Алюминий окисленный	200...600	0,11...0,19
Бронза полированная	50	0,1
Бронза пористая шероховатая	50...150	0,55
Бумага	20	0,8...0,9
Латунь полированная	200	0,03
Латунь листовая прокатанная	20	0,06
Латунь тусклая	50...350	0,22
Латунь окисленная	200...600	0,59...0,61
Медь полированная	50...100	0,02
Медь окисленная	500	0,88
Сажа ламповая	40...370	0,95
Сталь листовая шлифованная	950...1100	0,55...0,61
Сталь окисленная шероховатая	40...370	0,94...0,97
Сталь с плоской шероховатой поверхностью	50	0,56
Штукатурка известковая	10...90	0,91

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Коэффициент теплопроводности различных материалов

Материал	Плотность, кг/м ³	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·град)	Теплоемкость, Дж/(кг·град)
ABS (АБС пластик)	1030...1060	0.13...0.22	1300...2300
<u>Алюминий</u> (ГОСТ 22233-83)	2600	221	840
<u>Асбест</u> волокнистый	470	0.16	1050
Асбестоцемент	1500...1900	1.76	1500
Асбестоцементный лист	1600	0.4	1500
<u>Базальт</u>	2600...3000	3.5	850
Бетон на котельном шлаке	1400	0.56	880
Бетон на песке	1800...2500	0.7	710
Бетон термоизоляционный	500	0.18	
Битумоперлит	300...400	0.09...0.12	1130
<u>Вата минеральная</u> легкая	50	0.045	920
Вата минеральная тяжелая	100...150	0.055	920
<u>Вата стеклянная</u>	155...200	0.03	800
Гипс формованный сухой	1100...1800	0.43	1050
Гипсокартон	500...900	0.12...0.2	950
Гипсоперлитовый раствор		0.14	
<u>Гипсошлак</u>	1000...1300	0.26...0.36	
<u>Глина</u>	1600...2900	0.7...0.9	750
Глина огнеупорная	1800	1.04	800
Гравий керамзитовый (ГОСТ 9759-83) - засыпка	200...800	0.1...0.18	840
Гравий шунгизитовый (ГОСТ 19345-83) - засыпка	400...800	0.11...0.16	840
Гранит (облицовка)	2600...3000	3.5	880
<u>Доломит плотный сухой</u>	2800	1.7	
<u>Дюралюминий</u>	2700...2800	120...170	920
<u>Железо</u>	7870	70...80	450
Железобетон	2500	1.7	840
<u>Золото</u>	19320	318	129
<u>Известняк</u> (облицовка)	1400...2000	0.5...0.93	850...920
Изделия из вспученного перлита на би- тумном связующем (ГОСТ 16136-80)	300...400	0.067...0.11	1680
<u>Изделия вулканитовые</u>	350...400	0.12	
Камень строительный	2200	1.4	920

Материал	Плотность, кг/м ³	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·град)	Теплоемкость, Дж/(кг·град)
Карболит черный	1100	0.23	1900
Картон облицовочный	1000	0.18	2300
Картон строительный многослойный (ГОСТ 4408-75)	650	0.13	2390
<u>Керамзит</u>	800...1000	0.16...0.2	750
<u>Керамика</u>	1700...2300	1.5	
Кирпич облицовочный	1800	0.93	880
Кирпич строительный	800...1500	0.23...0.3	800
Кладка из газосиликатных теплоизоляционных плит	540	0.24	880
Краска масляная (эмаль)	1030...2045	0.18...0.4	650...2000
Кремний	2000...2330	148	714
<u>Латунь</u>	8100...8850	70...120	400
<u>Лед -60°С</u>	924	2.91	1700
Лед -20°С	920	2.44	1950
Лед 0°С	917	2.21	2150
Линолеум поливинилхлоридный многослойный (ГОСТ 14632-79)	1600...1800	0.33...0.38	1470
<u>Маты и полосы из стеклянного волок- на прошивные (ТУ 21-23-72-75)</u>	150	0.061	840
Мел	1800...2800	0.8...2.2	800...880
<u>Медь (ГОСТ 859-78)</u>	8500	407	420
Паркет дубовый	1800	0.42	1100
Паркет штучный	1150	0.23	880
<u>Пенобетон</u>	300...1250	0.12...0.35	840
Пенопласт ПХВ-1 (ТУ 6-05-1179-75) и ПВ-1 (ТУ 6-05-1158-78)	65...125	0.031...0.052	1260
Пенополистирол (ГОСТ 15588-70)	40	0.038	1340
Пергамин (ГОСТ 2697-83)	600	0.17	1680
Песок для строительных работ (ГОСТ 8736-77)	1600	0.35	840
Пихта	450...550	0.1...0.26	2700
Плита пробковая	80...500	0.043...0.055	1850
<u>Плиты из гипса ГОСТ 6428</u>	1000...1200	0.23...0.35	840
Плиты из ячеистого бетона ГОСТ 5742	350...400	0.093...0.104	
Плиты камышитовые	200...300	0.06...0.07	2300
Плиты минераловатные повышенной жесткости на органофосфатном связующем (ТУ 21-РСФСР-3-72-76)	200	0.064	840

Материал	Плотность, кг/м ³	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·град)	Теплоемкость, Дж/(кг·град)
Поливинилхлорид (ПВХ)	1400...1600	0.15...0.2	
Поликарбонат (дифлон)	1200	0.16	1100
Полипропилен (ГОСТ 26996 – 86)	900...910	0.16...0.22	1930
<u>Полистирол</u> УПП1, ППС	1025	0.09...0.14	900
Полистиролбетон (ГОСТ 51263)	200...600	0.065...0.145	1060
<u>Полихлорвинил</u>	1290...1650	0.15	1130...1200
<u>Полиэтилен</u> высокой плотности	955	0.35...0.48	1900...2300
Полиэтилен низкой плотности	920	0.25...0.34	1700
Раствор сложный (песок, известь, цемент)	1700	0.52	840
<u>Резина</u> мягкая		0.13...0.16	1380
Резина твердая обыкновенная	900...1200	0.16...0.23	1350...1400
<u>Серебро</u>	10500	429	235
Сланец глинистый вспученный	400	0.16	
<u>Смола</u> эпоксидная	1260...1390	0.13...0.2	1100
Сосна смолистая 15% влажности	600...750	0.15...0.23	2700
Сталь стержневая арматурная (ГОСТ 10884-81)	7850	58	482
<u>Стекло</u> оконное (ГОСТ 111-78)	2500	0.76	840
Стекловата	155...200	0.03	800
<u>Стекловолокно</u>	1700...2000	0.04	840
<u>Стеклопластик</u>	1800	0.23	800
<u>Текстолит</u>	1300...1400	0.23...0.34	1470...1510
<u>Чугун</u>	7220	40...60	500
<u>Штукатурка</u> гипсовая	800	0.3	840
<u>Эбонит</u>	1200	0.16...0.17	1430
Эбонит вспученный	640	0.032	
Эковата	35...60	0.032...0.041	2300
<u>Энсонит</u> (прессованный картон)	400...500	0.1...0.11	
<u>Эмаль</u> (кремнийорганическая)		0.16...0.27	

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гончаров, С. А. Термодинамика: Учебник / Гончаров С.А., - 2-е изд., стер. - Москва :МГГУ, 2002. - 440 с.: ISBN 5-7418-0010-6.
2. Крутов В.И. Техническая термодинамика: Учеб. для машиностроит. спец. вузов / В.И. Крутов, С.И. Исаев, И.А. Кожин и др.; Под ред. В.И. Крутова. 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1991. – 384 с.
3. Кудинов, В. А. Теплотехника: Учебное пособие / В.А. Кудинов, Э.М. Карташов, Е.В. Стефанюк. - М.: КУРС: НИЦ ИНФРА-М, 2019. - 424 с.: ил.; - (Высшее образование). - ISBN 978-5-905554-80-3.
4. Теплотехника : учебник / под общ. ред. А. М. Архарова, В. Н. Афанасьева. - 6-е изд. - Москва : МГТУ им. Баумана, 2018. - 880 с. - ISBN 978-5-7038-4902-6.
5. Теплотехника: Учеб. Для вузов / В.Н. Луканин, М.Г. Шатров, Г.М. Камфер и др.; Под ред. В.Н. Луканина. – М.: Высш.шк, 2002. – 671 с.
6. Сергеев А.Г., Крохин В.В. Метрология. – М.: Логос, 2000. – 408 с.

БУШУЕВ АНТОН НИКОЛАЕВИЧ

ТЕПЛОТЕХНИКА

Лабораторный практикум
для студентов направления подготовки 18.03.01 Химическая технология,
всех форм обучения

Подписано в печать 26.12.2023 г.		
Формат 60x90 $\frac{1}{16}$ Рег. № 267	Печать цифровая Тираж 10 экз.	Уч.-изд.л. 3,69

ФГАОУ ВО

Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

Новотроицкий филиал

462359, Оренбургская обл., г. Новотроицк, ул. Фрунзе, 8.

E-mail: nf@misis.ru

Контактный тел. 8 (3537) 679729.