

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования
**«Владимирский государственный университет имени
Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»
(ВлГУ)**

Кафедра “Тепловые двигатели и энергетические установки”

ТЕПЛОТЕХНИКА

Практикум

(Исправленный и дополненный)

Составители:

**В.М.Басуров
В.Ф.Гуськов
А.Ю.Абалаев**

Под редакцией канд. техн. наук
В.М. Басурова

Владимир, 2018

УДК 536:621.43
ББК 31.311/312:39.35-01
Т35

Рецензент

Кандидат технических наук, профессор
Владимирского государственного университета имени
Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых
В.И. Тарасенко

Печатается по решению редакционно - издательского совета Владимирского
государственного университета

Теплотехника: Практикум/ Владим. гос. ун-т; сост.: В.М.
Басуров, В.Ф. Гуськов, А.Ю. Абаляев. Владимир, 2018. 75 с.

Включает четыре лабораторных работы по технической
термодинамике и пять работ по теплопередаче.

Предназначен для студентов направлений 23.03.03; 08.03.01;
20.02.04; 13.03.03. Лабораторные работы №№ 1,2,3 составлены
профессором Гуськовым В.Ф., работы №№ 5,6,8 доцентом Басуровым
В.М., работы №№ 7,9 доцентом Абаляевым А.Ю.

В практикуме некоторые исходные данные были использованы
из следующих изданий:

- Техническая термодинамика: Методические указания к
самостоятельной работе студентов / Владим. гос. ун-т; Сост.: А.Я.
Шкарупило, Ю.Г. Горнушкин, А.И. Кольчугина. Владимир, 1997.

- Теория теплообмена: Метод. указания к самостоятельной
работе студентов / Владим. гос. ун-т; Сост.: А.Я. Шкарупило, А.И.
Кольчугина. Владимир, 1996.

Табл. 18. Ил. 21. Библиогр.: 5 назв.

УДК 621.43 (07)

ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ И ОФОРМЛЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

В 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.

Для определения степени подготовки студента к предстоящей работе преподаватель проводит опрос по тематике работы. *Если степень подготовленности будет признана недостаточной, выполнение лабораторной работы не разрешается.*

При выполнении работы студенты должны строго соблюдать все правила техники безопасности, с которыми они были ознакомлены на инструктаже. Лабораторная установка включается и выключается только преподавателем. При выполнении работы студент записывает результаты измерений в протокол наблюдений, который является основной частью отчета о работе. Протокол должен быть подписан преподавателем, проводящим занятие.

Отчет о работе выполняется в соответствии с требованиями стандарта предприятия (СТП 71.4 – 84. Общие положения, структура, требования и правила оформления отчетов о лабораторных работах). Отчет должен содержать: основы теории, принципиальную схему установки, краткое описание выполненной работы, протокол наблюдений, результаты обработки опытных данных, необходимые графические зависимости, расчет погрешности опытных данных и выводы. Графики выполняются *обязательно* на бумаге с миллиметровой сеткой с применением чертежных инструментов или методами компьютерной графики.

Для защиты выполненной работе следует предъявить преподавателю отчет, показать знание основных положений теории, техники и методики опыта, а также умение критически оценивать полученные результаты. При наличии хотя бы одной незащищённой работы студент к выполнению последующей не допускается.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ СОКРАЩЕНИЯ, ТЕРМИНЫ И ПОНЯТИЯ

СИ – средство измерения (измерительный прибор, измерительная система и др.). В сочетании «система СИ» данное сокращение означает «система интернациональная» и используется для обозначения действующей системы единиц физических величин.

МПТШ-90 – Международная практическая температурная шкала редакции 1990 г. Согласно МПТШ-90 основной единицей температуры является кельвин (К).

Данная шкала может быть также проградуирована и в градусах Цельсия (°С). Размер кельвина и градуса Цельсия в температурном отношении одинаков, поэтому разность температур может быть выражена как в кельвинах, так и в градусах Цельсия. В уравнениях и формулах термодинамики температуру выражают в кельвинах, а в технике – чаще в градусах Цельсия.

Если одно и то же значение температуры выразить в К и в °С, то связь между полученными значениями определится формулой:

$$T, K = t^{\circ C} + 273,15$$

НФУ – нормальные физические условия. Газообразное вещество находится при нормальных физических условиях, если его абсолютное давление составляет 101325 Па (760 мм рт. ст.), а температура по МПТШ-90 равна 273,15 К (0 °С).

УТС – установившееся тепловое состояние. Понятие УТС относится к экспериментальным установкам, измерительным приборам и т.п. Установившееся тепловое состояние наступает через некоторое время после пуска установки или изменения режима ее работы. О достижении УТС свидетельствует прекращение изменения (увеличения или уменьшения) температуры в местах ее измерения. Иногда вместо аббревиатуры УТС используют эквивалентное понятие «стационарное тепловое состояние». Стационарное - означает «неизменяющееся во времени».

Термоэлектрические термометры. Широко используются в теплофизических экспериментах. Представляют собой комплект из термопары и показывающего прибора.

Термопара – два проводника из разных металлов, в одном месте электрически соединенные друг с другом. Соединение может быть выполнено пайкой, скруткой, газовой или электрической сваркой. Независимо от способа соединения проводников, место соединения называют *рабочим спаем* термопары. Этот спай при измерениях является чувствительным элементом (датчиком) температуры.

При нагреве рабочего спая в цепи термопары возникает термоэлектродвижущая сила (ТЭДС), пропорциональная температуре спая.

Электродвижущая сила измеряется показывающим прибором – потенциометром или милливольтметром, шкалу которых обычно градуируют не в единицах ТЭДС, а непосредственно в градусах Цельсия. К одному показывающему прибору с помощью переключателя могут быть подключены несколько термопар, что дает возможность измерять температуру в нескольких точках экспериментальной установки.

Термопары изготавливаются из специальных сплавов (хромель, алюмель, константан и др.). Часто используются хромель-копелевые термопары; сокращенное их обозначение – ТХК.

Расходомеры. Количество (объем или масса) жидкого или газообразного вещества, проходящего через трубопровод или отверстие за единицу времени, в технике называют *расходом* вещества. Расход может быть объемным – например, м³/ч, м³/с, дм³/с, м³/мин и т.п., и массовым – например, кг/с, кг/ч, г/с и т.п. Соответствующие измерительные приборы или устройства называют расходомерами.

В учебных лабораторных установках по термодинамике для измерения расхода воздуха используются объемные расходомеры типа 1РГ-40. В металлическом корпусе расходомера на оси установлен ротор, вращающийся под действием потока воздуха, проходящего через расходомер. Количество оборотов ротора прямо связано с объемным расходом воздуха и подсчитывается механическим счетчиком, входящим в конструкцию расходомера. Шкала счетчика проградуирована непосредственно в кубических метрах. Фиксируя с помощью секундомера время, за которое через счетчик прошло определенное количество воздуха, например, 1 м³, определяют объемный расход воздуха, выраженный в м³/ч, м³/мин и т.п.

Определение количества теплоты. В теплофизических экспериментах, как правило, требуется к рабочему веществу (газу) подводить известное количество теплоты. Чаще всего теплота подводится при помощи электрического нагревателя, получающего питание от электросети. Поскольку в теплоту переходит вся электроэнергия, рассеиваемая на электрическом сопротивлении нагревателя, то тепловой поток может быть определен по показаниям ваттметра, измеряющего электрическую мощность, потребляемую нагревателем, т. е. $\Phi = W$, где W – показания ваттметра, Вт, Φ – тепловой поток, Дж/с, (Вт).

ПОНЯТИЯ О ПОГРЕШНОСТЯХ ИЗМЕРЕНИЙ

Измерить какую-либо величину – значит определить опытным путем соотношение между этой величиной и некоторым ее значением, принятым за единицу.

В зависимости от того, каким способом находят числовые значения искомой величины, измерения подразделяются на два вида – прямые и косвенные.

При *прямых* измерениях результат получается непосредственно с помощью средств измерений, градуированных в соответствующих единицах. К.

прямым измерениям относятся, например, определение температуры термометром, электрического напряжения – вольтметром.

К *косвенным* измерениям относятся такие, при которых значения интересующих нас величин вычисляются по результатам прямых измерений одной или нескольких других величин, связанных с искомой величиной известной зависимостью. Например, изменение внутренней энергии газа в термодинамическом процессе определяется косвенно по известным значениям теплоемкости и измеренным значениям температуры.

Даже при самом тщательном измерении какой-либо величины не представляется возможным получить результат абсолютно свободный от искажений. Причины этих искажений различны – несовершенство средств и методов измерения, непостоянство условий измерения и ряд других.

Искажениями обусловлена так называемая *погрешность измерения* – отклонение результата измерения от истинного значения измеряемой величины. В задачу измерения всегда входит не только нахождение самой величины, но и оценка допущенной при измерении погрешности.

Погрешности измерений *по способу их числового выражения* подразделяют на *абсолютные*, выраженные в единицах измеряемой величины, и *относительные*, выраженные в процентах или долях этой величины. Погрешности вычисляются по следующим формулам:

$$\Delta A = A_x - A \quad \text{и} \quad \delta_A = (\Delta A/A) 100 \%,$$

где ΔA – абсолютная погрешность измерения; δ_A – относительная погрешность измерения, A_x – измеренное значение величины; A – истинное ее значение.

Строго говоря, истинное значение измеряемой величины всегда остается неизвестным. Поэтому практически под истинным значением величины понимают ее значение, найденное измерением с помощью приборов и методов более высокой точности.

Относительная погрешность дает более непосредственное, осязаемое представление о точности выполненного измерения, чем абсолютная. Действительно, если измерить длину карандаша (10 см) с абсолютной погрешностью $\Delta l = \pm 1$ см, то такое измерение нельзя признать особенно

точным и ему соответствует довольно большая относительная погрешность, равная $\pm 10\%$.

Если с такой же абсолютной погрешностью ($\Delta l = \pm 1$ см) измерить длину помещения (10 м), то это измерение значительно более точное и характеризуется малой относительной погрешностью, равной $\pm 0,1\%$.

В практике часто используют понятие “точность измерений”. Обычно точность измерений характеризуют величиной максимально возможной (так называемой предельной) относительной погрешности. Поэтому, если утверждают, что точность измерения величины A равна $\pm 1,5\%$, то это означает, что относительная погрешность измерения данной величины не превосходит $\pm 1,5\%$ (но фактически может быть и меньше).

Погрешности измерений *по характеру их проявления* подразделяют на систематические, случайные и грубые. *Систематические* погрешности остаются постоянными или же закономерно изменяются при повторных измерениях одной и той же величины. *Случайные* погрешности возникают в результате совокупного действия различных случайных причин и являются неопределенными по величине и знаку. Их влияние на результаты измерений учитывают методами математической статистики. *Грубые* погрешности чаще всего связаны с резким нарушением условий измерений. Результаты, содержащие грубые ошибки, должны быть отброшены как недостоверные.

Лабораторная работа № 1

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗОХОРНОГО ПРОЦЕССА

Назначение работы. Исследование процессов идеальных газов на примере изохорного процесса воздуха.

Задание

1. Провести экспериментальное исследование зависимости давления воздуха от температуры при постоянном объёме воздуха в колбе.
2. По экспериментальным данным построить графическую зависимость давления от температуры.
3. На том же графике построить изохору по расчетным данным.
4. Определить изменение внутренней энергии воздуха в процессе.
5. Определить изменение энтропии воздуха в процессе, считая теплоемкость постоянной.
6. Вычислить относительную погрешность экспериментальных данных.
7. Составить отчет и написать выводы.

Основные понятия

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

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

$$p_1/p_2 = T_1/T_2, \quad (1.1)$$

т. е. давление газа прямо пропорционально его температуре (закон Шарля). Работа расширения газа в изохорном процессе равна нулю, поскольку $dv = 0$:

$$l = \int_{v_1}^{v_2} p dv = 0.$$

Следовательно, вся подводимая к газу теплота расходуется полностью на изменение удельной внутренней энергии газа

$$dq = du = c_v dT,$$

откуда $\Delta u = \int_{T_1}^{T_2} c_v dT.$

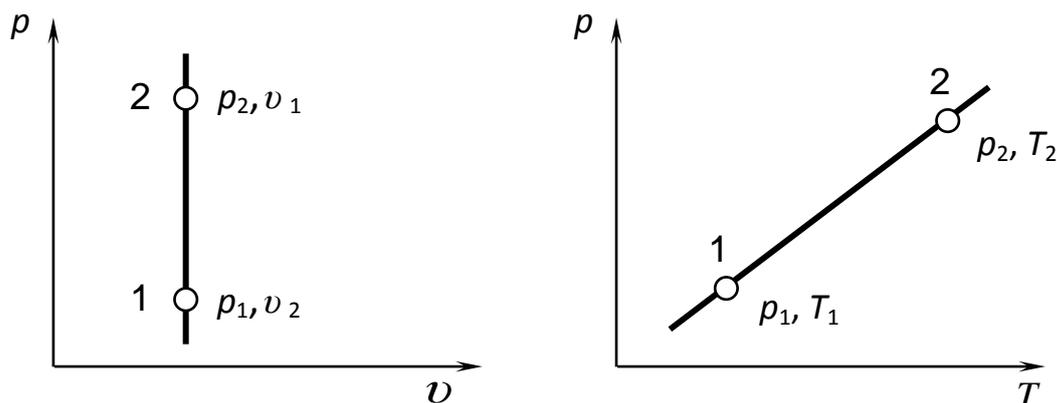


Рис. 1.1. Графики изохорного процесса

В приведенных выражениях индексы 1 и 2 относятся, соответственно, к начальной и конечной точкам процесса.

При постоянной теплоемкости c_v (независящей от температуры)

$$\Delta u = u_2 - u_1 = c_v (T_2 - T_1), \text{ кДж/кг.} \quad (1.2)$$

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

$$\Delta u = u_2 - u_1 = c_v \Big|_{0^\circ\text{C}}^{T_2} \cdot T_2 - c_v \Big|_{0^\circ\text{C}}^{T_1} \cdot T_1, \text{ кДж/кг.} \quad (1.3)$$

Значения теплоёмкостей принимаются по табл.1 в зависимости от t_2 и t_1 .

Изменение энтропии в обратимом изохорном процессе (при постоянной теплоемкости) определяется по уравнению, кДж/(кг·К)

$$\Delta s = s_2 - s_1 = c_v \ln(T_2/T_1). \quad (1.4)$$

Экспериментальная установка

Плотно закрытый металлический сосуд 3 (рис.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.

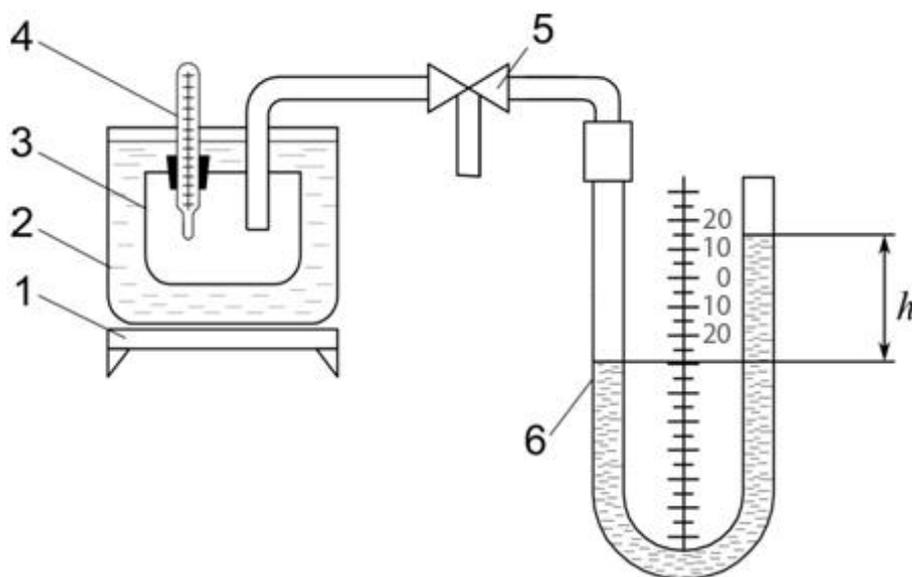


Рис. 1.2. Схема экспериментальной установки

Порядок выполнения работы

1. Изучить установку и ознакомиться с правилами работы на ней.
2. Убедиться, что вода полностью покрывает сосуд 3. При необходимости добавить воду.

3. Установить в системе исходное давление, равное атмосферному, при этом уровни воды в трубочках манометра 6 покажут нуль. Включить нагреватель в сеть.

4. При начале движения мениска U-образного манометра 6 зафиксировать температуру и через каждые 5 мм вод. ст. продолжать регистрировать температуру в сосуде 3 (по термометру) и давление воздуха (величину h по манометру).

5. При давлении 35 мм вод. ст. опыт прекратить и отключить установку от электрической сети.

6. Зарегистрировать величину атмосферного давления по лабораторному барометру. Данные всех измерений в процессе эксперимента внести в протокол наблюдений по форме, показанной в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Протокол наблюдений

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

Обработка экспериментальных данных

1. Перевести результаты измерений (при необходимости) в единицы СИ. Полученные значения величин записать в соответствующие колонки табл. 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 кельвинах:

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

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

$$p_i = p_1 T_i / T_1,$$

где p_1 и T_1 – начальные давление и температура воздуха в сосуде (первая точка процесса); p_i и T_i – параметры последующих точек процесса (2,3...).

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 определенный промежуток температуры взять из табл. 1 приложения.

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) записать в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Результаты обработки экспериментальных данных

Параметры и погрешности	Номера опытных точек						
	1	2	3	4	5	6	7
Температура, К							
Абсолютное давление экспериментальное, Па							
Абсолютное давление расчетное, Па							
Разность между экспериментальным и расчетным давлениями, Па							
Относительная разность экспериментального и расчетного давлений, %							

Вопросы и задания для самоконтроля

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

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ПОЛИТРОПЫ РАСШИРЕНИЯ ВОЗДУХА

Назначение работы. Определение показателя политропы расширения воздуха с помощью экспериментальной установки.

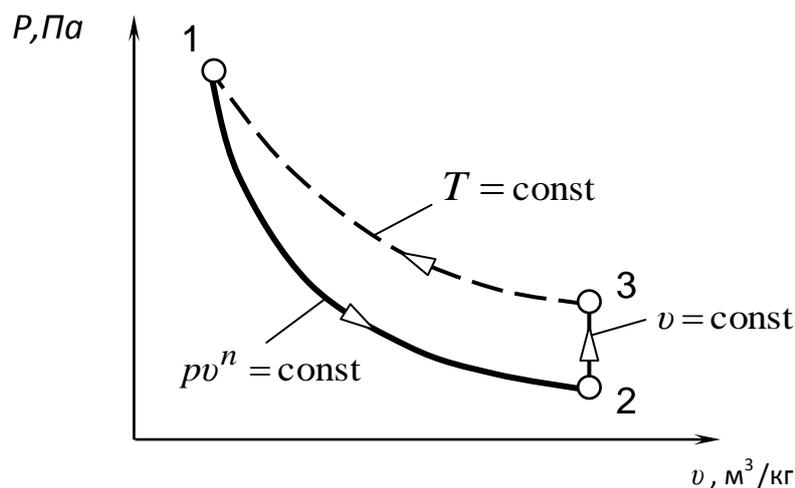


Рис. 2.1. Схема к определению показателя политропы расширения воздуха

Задание

1. Провести экспериментальное исследование политропного процесса на установке.

2. Определить значение показателя политропы расширения воздуха.
3. Построить графики процессов, происходящих в установке.
4. По результатам расчётов построить графики процесса в координатах $P - v$ и $T - S$.
5. Составить отчёт и сделать выводы.

Основные понятия

Из уравнения политропного процесса 1-2 (рис. 2.1)

$$p_1 v_1^n = p_2 v_2^n \quad (2.1)$$

следует, что для определения величины показателя политропы достаточно знать давление и удельный объем газа в начале и конце процесса.

Логарифмируя уравнение (2.1), получим

$$\ln p_1 + n \ln v_1 = \ln p_2 + n \ln v_2,$$

откуда

$$n = \frac{\ln(p_1/p_2)}{\ln(v_2/v_1)}. \quad (2.2)$$

Экспериментальное определение показателя политропы на основе этой формулы затруднительно, так как измерить удельный объем воздуха v_2 достаточно сложно. Поэтому формулу (2.2) целесообразно представить в другом виде так, чтобы измерять только давление. Возможность такого преобразования легко установить, рассмотрев рис. 2.1, на котором кроме политропного процесса расширения 1-2 изображен изохорный процесс 2-3 нагревания воздуха до температуры T_3 , равной T_1 .

Для изотермы 1-3

$$v_3/v_1 = p_1/p_3.$$

Но $v_3 = v_2$, поэтому

$$v_2/v_1 = p_1/p_3.$$

С учетом последнего соотношения формулу (2.2) можно записать в виде

$$n = \frac{\ln(p_1/p_2)}{\ln(p_1/p_3)}. \quad (2.3)$$

Формула (2.3) является расчетной. Из нее следует, что для определения показателя политропы необходимо измерить давление в начале и конце

политропного расширения (p_1 и p_2) и давление (p_3) в конце последующего изохорного нагревания воздуха до температуры окружающей среды T_1)

Экспериментальная установка

Принципиальная схема экспериментальной установки показана на рис. 2.2. В состав установки входит металлический бак 3 вместимостью 40 л, оснащенный краном 4 для выпуска воздуха, U-образный жидкостный манометр 2 для измерения избыточного давления в баке, ручной насос 1 для

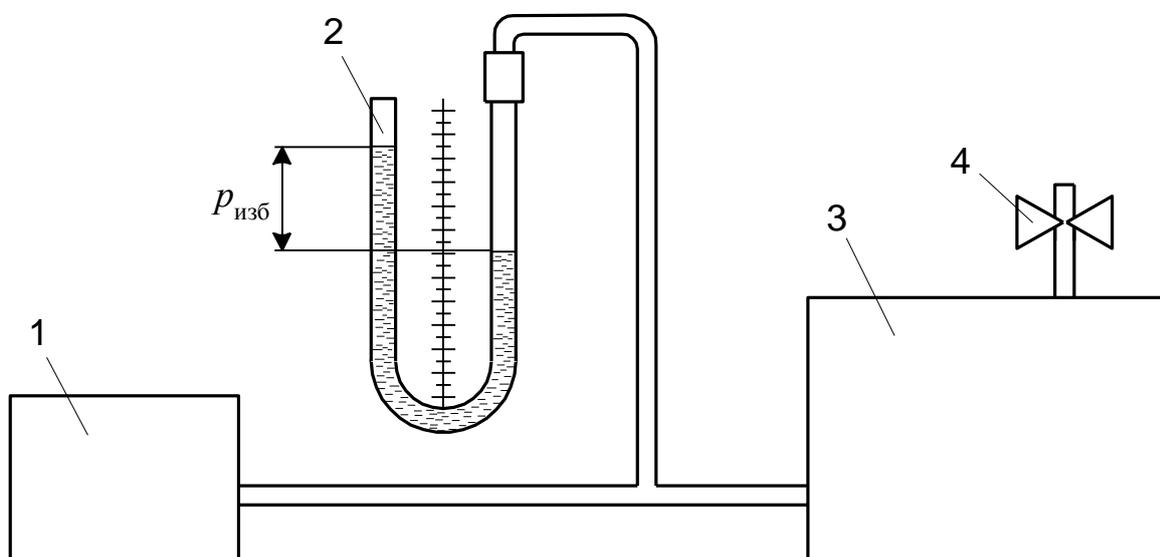


Рис. 2.2. Схема экспериментальной установки

нагнетания воздуха.

Параметры состояния атмосферного воздуха в лаборатории во время проведения опыта регистрируются термометром и барометром.

Порядок выполнения работы

Записать параметры состояния атмосферного воздуха – температуру $t_{\text{атм}}, ^\circ\text{C}$ и давление $p_{\text{атм}}, \text{Па}$ – в протокол наблюдений.

Протокол наблюдений

$t_{\text{атм}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{атм}}, \text{K}$	$p_{\text{атм}}, \text{Па}$	$p_{1\text{изб}},$ мм вод. ст.	$P_{1\text{изб}}, \text{Па}$	$p_{3\text{изб}},$ мм вод. ст.	$P_{3\text{изб}}, \text{Па}$

1. С помощью насоса произвести нагнетание воздуха в бак до избыточного давления $p_{1\text{изб}}$, величина которого ограничивается высотой

2. трубок манометра. В результате температура воздуха в баке несколько возрастет.

3. Выждать 5-7 минут, в течение которых воздух в баке охладится до температуры $T_1 = T_{\text{атм}}$. О достижении этой температуры можно судить по установившемуся показанию жидкостного манометра. Величину избыточного давления $p_{1\text{изб}}$ в миллиметрах водяного столба записать в протокол наблюдений.

4. Резко открыть кран и следить за показаниями манометра. При достижении равенства уровней воды в трубках, т. е. после расширения воздуха в баке до давления $p_2 = p_{\text{атм}}$, кран закрыть и снова следить за показаниями манометра.

В результате расширения воздуха температура в баке уменьшится до $T_2 < T_1$. Поэтому *после закрытия крана* воздух станет нагреваться вследствие теплообмена с окружающей средой через стенки бака. Процесс нагревания воздуха происходит по изохоре 2 – 3 с возрастанием давления до p_3 (см. рис. 2.1).

5. После полного прекращения роста давления в баке (через 5-7 минут) измерить и записать в протокол наблюдений избыточное давление в конце изохорного процесса.

Обработка экспериментальных данных

1. Вычислить значения абсолютных давлений в точках 1, 2 и 3 (см. рис. 2.1) по формулам:

$$p_1 = p_{1\text{изб}} + p_{\text{атм}},$$

$$p_2 = p_{\text{атм}},$$

$$p_3 = p_{3\text{изб}} + p_{\text{атм}}.$$

2. Вычислить показатель политропы по формуле (2.3).

3. Принимая значение плотности ρ воздуха из табл.4 при температуре окружающей среды найти его массу по формуле $m = \rho V$, где: V – объем бака (40 л), а затем вычислить удельный объем воздуха $v_2 = \frac{V}{m}, \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$

4. Используя уравнение политропы $P_1 \cdot v_1^n = P_2 \cdot v_2^n$, вычислить удельный объем v_1 , и температуру T_2 в точке 2 по уравнению: $T_1 v_1^{n-1} = T_2 v_2^{n-1}$. (n – вычисленное значение показателя политропы).

5. Принимая значение энтропии в точке 1 за начало отсчета (на пример, за нуль), вычислить ее в точке 2 в процессе политропного расширения по формуле:

6. $s_1 - s_2 = c_v \frac{n-k}{n-1} \ln \frac{T_2}{T_1}$, т.к. воздух в процессе 1 - 2 расширяясь, отдает тепло, а это приводит к уменьшению энтропии (от точки 1 до точки 2). Величина c_v принимается по таблице приложения как средняя между температурами T_1 и T_2 , показатель адиабаты k для воздуха принять равным 1.41.

7. Рассчитать увеличение энтропии в конце изохорного процесс 2-3 по формуле: $s_3 - s_2 = c_v \ln \frac{T_3}{T_2}$.

8. По результатам измерений и вычисленных значений v и s построить графики политропного процесса в координатах $p - v$ и $T - s$. При выборе масштабов учитывать реальные диапазоны изменения параметров состояния воздуха.

Вопросы и задания для самоконтроля

1. Какой процесс называется политропным?
2. В каких пределах может изменяться показатель политропы в различных процессах?
3. Как определить работу расширения газа и количество подводимой теплоты в политропном процессе?
4. В каких политропных процессах теплота к газу подводится, а в каких отводится?
5. Как с помощью лабораторной установки определить показатель адиабаты?
6. Как на лабораторной установке осуществить изотермическое расширение воздуха?
7. Указать на диаграмме (см. рис. 2.1) точки, соответствующие состоянию воздуха в лаборатории во время проведения опыта.
8. Энтропия и ее физический смысл. Почему она возрастает в рассмотренных процессах? Может ли она убывать?

Лабораторная работа № 3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОЕМКОСТИ ВОЗДУХА

Назначение работы. Углубление знаний о теплоемкостях газов, ознакомление с методикой опытного определения теплоемкости и получение навыков в проведении эксперимента.

Задание

1. Экспериментально определить среднюю объемную изобарную теплоемкость воздуха методом проточного калориметрирования.

2. По экспериментальным данным вычислить средние массовую, объемную и молярную изобарные теплоемкости воздуха; средние массовую, объемную и молярную изохорные теплоемкости воздуха.
3. Определить показатель адиабаты воздуха.
4. Вычислить энтальпию и внутреннюю энергию воздуха при его температуре на выходе из калориметра.
5. Сравнить полученные данные со справочными.
6. Составить отчет о выполненной работе и сделать выводы.

Основные понятия

Для определения количества теплоты, участвующей в любом процессе, используется понятие теплоемкости, представляющее собой количество теплоты, необходимое для изменения температуры единицы количества вещества в каком-либо термодинамическом процессе на один кельвин.

Теплоемкость единицы количества вещества называется удельной. Различают массовую c , кДж/(кг·К), объемную c' , кДж/(м³·К) и молярную μc , кДж/(кмоль·К) теплоемкости. Связь между ними выражается соотношениями

$$c = \mu c / \mu; \quad c' = \mu c / 22,416 = c \rho_t. \quad (3.1)$$

Здесь ρ_H – плотность газа при нормальных физических условиях (НФУ), кг/м³,

$$\rho_H = p_H / (R T_H),$$

где p_H , T_H – давление и температура газа при НФУ ($p_H = 101332,5$ Па, $T_H = 273,15$ К); R – его газовая постоянная, Дж/(кг·К); μ – молекулярная масса, кг/кмоль; $22,416$ м³/кмоль – объем киломоля идеального газа при НФУ. Для воздуха $R = 287$ Дж/(кг·К), $\mu = 28,97$ кг/кмоль и $\rho_H = 1,293$ кг/м³.

Теплоемкость зависит от характера термодинамического процесса, в котором теплота подводится к газу или отводится от него. При экспериментальном определении ее значения обычно используют два термодинамических процесса, протекающих при постоянных объеме ($v = \text{const}$) или давлении ($p = \text{const}$), а теплоемкости этих процессов называют изохорной c_v и изобарной c_p . Подведенная к газу в изохорном процессе теплота расходуется только на изменение внутренней энергии, так как работа внешняя $dl = 0$. Под внутренней энергией понимают кинетическую энергию хаотического движения молекул и атомов, а также потенциальную энергию сил взаимодействия между молекулами.

В изобарном процессе, в отличие от изохорного, теплота расходуется как на изменение удельной внутренней энергии, так и на совершение внешней работы, поэтому для изменения температуры тела на 1 К при $p = \text{const}$

требуется большее количество теплоты, чем при $v = \text{const}$ и, следовательно, $c_p > c_v$. Под энтальпией понимают термодинамическую функцию $h = u + p v$, физический смысл которой состоит в том, что это есть полная энергия расширенной термодинамической системы.

Внутренняя энергия и энтальпия идеального газа зависят только от температуры и вычисляются по формулам:

$$u = \int_{273,15}^T C_v dT = C_v \Big|_{273,15}^T \cdot T \quad (3.2)$$

$$h = \int_{273,15}^T C_p dT = C_p \Big|_{273,15}^T \cdot T \quad (3.3)$$

Внутренняя энергия и энтальпия идеальных газов принимаются равными нулю при $T = 273,15$ К. Связь между изобарной и изохорной теплоемкостями устанавливается уравнением Майера:

$$c_p - c_v = R; \quad c'_p - c'_v = \rho R; \quad \mu c_p - \mu c_v = \mu R. \quad (3.4)$$

Для нормальных физических условий

$$c'_p - c'_v = \mu R / 22,416 = 0,371 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}),$$

где μR – универсальная газовая постоянная, $\mu R = 8314,2$ Дж/(кмоль·К).

Отношение изобарной теплоемкости к изохорной называют показателем адиабаты

$$k = c_p / c_v = c'_p / c'_v = \mu c_p / \mu c_v. \quad (3.5)$$

Используя соотношения (3.4), (3.5) и зная величину k , можно определить:

$$c_v = R / (k - 1) \quad \text{и} \quad c_p = k R / (k - 1).$$

Теплоемкость газа зависит от температуры. В зависимости от интервала температур различают истинную c и среднюю c_m удельные теплоемкости.

Истинной называют теплоемкость, соответствующую бесконечно малому изменению температуры:

$$c = \delta q / dT$$

Количество теплоты, необходимое для нагревания единицы количества вещества на один кельвин в некотором *интервале* температур, называют *средней теплоемкостью в этом температурном интервале*:

$$c_m \Big|_{T_1}^{T_2} = q_{1-2} / (T_2 - T_1).$$

Для многих теплотехнических расчетов зависимость теплоемкости от температуры принимают линейной $c = a + bT$, либо выражают степенным полиномом вида $c = a + bT + dT^2 + \dots$, где a, b, d – постоянные, зависящие от природы газа.

Поскольку $q_{1-2} = \int_{T_1}^{T_2} c dT$, то

$$c_m \Big|_{T_1}^{T_2} = \int_{T_1}^{T_2} c dT / (T_2 - T_1) = \left(c_m \Big|_{273,15}^{T_2} T_2 - c_m \Big|_{273,15}^{T_1} T_1 \right) / (T_2 - T_1), \quad (3.6)$$

где $c_m \Big|_{273,15}^T$ – средняя теплоемкость в интервале температур от 273,15 К до T К;
 T_1 и T_2 – граничные температуры интервала, для которого определяется c_m, K .

Теплоемкость идеальных газов зависит от температуры. Величина теплоемкости реальных газов зависит также и от давления, влияние которого при высоких температурах ($t > 1000$ °С) незначительно. У водяного пара при давлениях ниже критического с повышением давления при низких температурах теплоемкость растет медленно, а при высоких быстро увеличивается, достигая при критической температуре бесконечности. При увеличении давления выше критического с ростом температуры теплоемкость постоянно уменьшается.

Таблицы средней теплоемкости и термодинамических функций воздуха в зависимости от температуры приведены в приложении (табл. 1 и 2).

Экспериментальная установка

Схема установки для определения изобарной объемной теплоемкости воздуха методом проточного калориметрирования показана на рисунке.

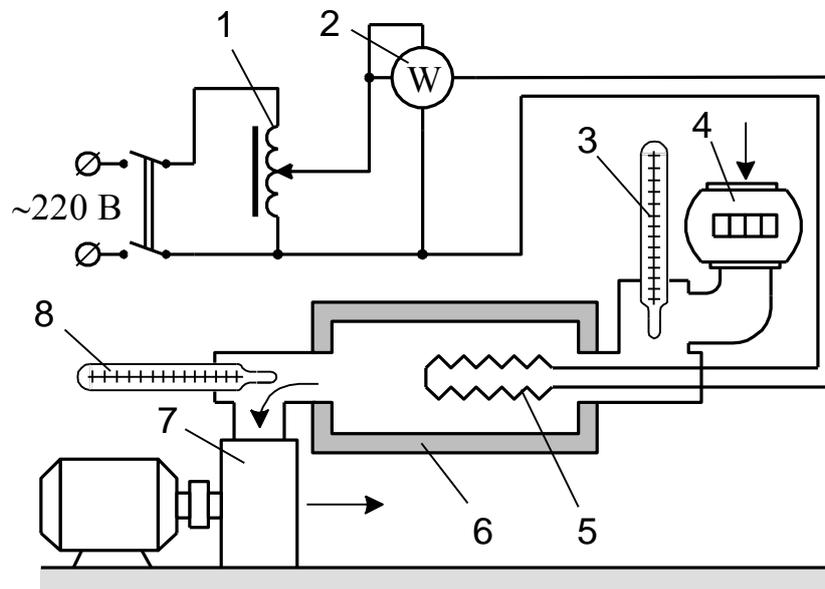


Схема экспериментальной установки

Воздух объемным насосом 7 прокачивается через калориметр 6, представляющий собой стеклянную трубку, покрытую слоем тепловой изоляции. Внутри калориметра находится электрический нагреватель 5. Мощность, потребляемая нагревателем и преобразуемая в теплоту, устанавливается регулятором напряжения 1 и измеряется ваттметром 2. Температура воздуха на входе в калориметр и на выходе из него измеряется термометрами 3 и 8. Количество воздуха, прошедшее через систему за определенный промежуток времени, определяется объемным расходомером 4.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с установкой и измерительной аппаратурой.
2. Включить насос.
3. Рукоятку регулятора напряжения поставить в нулевое положение и включить регулятор в сеть.
4. Поворотом рукоятки регулятора подать напряжение на нагреватель, установив величину мощности *по заданию преподавателя*.
5. *После установления постоянной температуры воздуха на выходе из калориметра*, записать показания объемного расходомера в начале и в конце опыта (продолжительность опыта 5 мин), показания ваттметра, температуру воздуха на входе в калориметр и на выходе из него. Атмосферное давление измерить один раз перед началом эксперимента.
6. С интервалом 4 мин сделать еще один опыт в соответствии с п. 5.

7. Рукоятку регулятора напряжения установить в нулевое положение, отключить регулятор от сети, выключить насос.
8. Результаты измерений занести в протокол наблюдений (табл. 3.1).

Таблица 3.1

Протокол наблюдений

Номер опыта	Показания ваттметра W , Вт	Температура воздуха в калориметре, °С		Показания расходомера воздуха, м ³		Объем воздуха, прошедшего через калориметр, V , м ³		Атмосферное давление $p_{\text{атм}}$, Па
		на входе t_1	на выходе t_2	в начале опыта	в конце опыта	за 5 мин	за 1 с	

Обработка экспериментальных данных

Обработка ведется по данным последнего опыта.

1. Вычислить среднюю объемную изобарную теплоемкость по уравнению:

$$c'_{pm} = W \cdot 10^{-3} / [\varphi V_H (T_2 - T_1)] , \text{ кДж}/(\text{м}^3\text{К}),$$

где $Q = W \cdot 10^{-3}$ – тепловой поток, подведенный к воздуху в калориметре за 1 секунду, кДж/с (кВт); φ – коэффициент расхода объемного расходомера, величина которого принимается в пределах 0,35...0,45; T_1 и T_2 – температура воздуха на входе в калориметр и на выходе из него, К; V_H – объем воздуха, прошедшего через калориметр за 1 с и приведенный к НФУ, м³. Для определения приведенного объема следует воспользоваться соотношением:

$$V_H = V \frac{p_{\text{атм}}}{p_H} * \frac{T_H}{t_1 + 273,15}$$

2. Пользуясь зависимостями (3.1) и (3.4), вычислить средние массовую, объемную и молярную изобарные теплоемкости, а также средние массовую, объемную и молярную изохорные теплоемкости.

Из соотношений (3.5) определить показатель адиабаты k .

3. Пользуясь выражением (3.6) и зависимостями (3.1) и (3.4), вычислить все средние теплоемкости по справочным данным (табл. 1 приложения).

4. Из выражений (3.2) и (3.3) определить внутреннюю энергию и энтальпию воздуха при температуре T_2 на выходе из калориметра.

5. Полученные значения изобарных и изохорных теплоемкостей, энтальпии и внутренней энергии занести в табл. 3.2 и сравнить со справочными значениями.

Таблица 3.2

Результаты обработки экспериментальных данных

Способ определения	Теплоемкости						Внутренняя энергия u , кДж/кг	Энтальпия h , кДж/кг
	c_{pm}	c_{vm}	c'_{pm}	c'_{vm}	μc_{pm}	μc_{vm}		
	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$		$\frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}}$		$\frac{\text{кДж}}{\text{кмоль} \cdot \text{К}}$			
Экспериментальный								
По справочным данным								
Расхождение данных, %								

Вопросы и задания для самоконтроля

1. Что называется удельной теплоемкостью?
2. Понятие средней и истинной теплоемкости.
3. Каков смысл величин, входящих в уравнение Майера?
4. Физический смысл газовой постоянной.
5. Какая из двух теплоемкостей c_p и c_v больше, и почему?
6. От чего зависит теплоемкость газов?
7. Дать определения теплоемкости газа в изотермическом и адиабатном процессах.
8. Написать уравнения для средней массовой, молярной и объемной теплоемкостей для смеси газов.
9. Как изменилось бы значение теплоемкости (стало бы завышенным или заниженным), если бы показания приборов были зарегистрированы до установления стационарного температурного режима?
9. Понятие внутренней энергии газа. Отличие внутренней энергии идеального газа от внутренней энергии реального.

10. Энтальпия. Выражение первого закона термодинамики с использованием понятия энтальпии.

Лабораторная работа № 4

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВО ВЛАЖНОМ ВОЗДУХЕ

Назначение работы. Изучение свойств влажного воздуха, получение практических навыков в работе с $h-d$ диаграммой и психрометрическими таблицами.

Задание

1. Исследовать на опытной установке процессы нагрева и насыщения воздуха влагой.
2. Определить с помощью психрометрической таблицы относительную влажность воздуха на входе в установку и на выходе из нее.
3. Изобразить процессы нагрева и насыщения воздуха в $h-d$ диаграмме влажного воздуха.
4. Определить по $h-d$ диаграмме параметры влажного воздуха в процессах его нагрева и насыщения влагой.
5. Рассчитать тепловой баланс установки и массу влаги, испарившейся в увлажнительной камере за время опыта.
6. Составить отчет о выполненной работе и сделать выводы

Основные понятия

Влажным воздухом называется смесь сухого воздуха и водяного пара. В связи с тем, что водяной пар при снижении температуры может переходить в другую фазу (жидкую или твердую), т.е. выпадать из смеси, влажный воздух представляет собой один из частных случаев газовой смеси.

Водяной пар во влажном воздухе может быть в насыщенном или перегретом состоянии. Пар, находящийся в равновесии с жидкостью,

называется насыщенным, а пар, имеющий температуру более высокую, чем температура кипения жидкости при заданном давлении – перегретым. Поэтому смесь сухого воздуха и насыщенного или перегретого водяного пара соответственно называется насыщенным и ненасыщенным влажным воздухом.

Температура, до которой необходимо охладить ненасыщенный воздух, чтобы содержащийся в нем перегретый пар стал насыщенным, называется температурой точки росы. При охлаждении влажного воздуха ниже температуры *точки росы* происходит конденсация водяного пара. Если влажный воздух имеет давление, близкое к атмосферному, то с достаточной для технических расчетов точностью можно рассматривать его как идеальный газ. В соответствии с законом Дальтона для идеальных газов давление p влажного воздуха равно сумме парциальных давлений сухого воздуха p_B и водяного пара p_{II}

$$p = p_B + p_{II} .$$

Парциальным называется давление, которое имел бы данный газ, если бы он находился в таком же количестве, в том же объеме и при той же температуре, что и в смеси.

Различают абсолютную и относительную влажность воздуха. Масса водяного пара, содержащегося в 1 м^3 влажного воздуха, называется *абсолютной влажностью*. Она численно равна плотности ρ_{II} пара в смеси при собственном парциальном давлении и температуре смеси, кг/м^3 ,

$$\rho_{II} = m_{II} / V_{см} ,$$

где m_{II} – масса пара, кг; $V_{см}$ – объем пара в смеси, равный рабочему объему всей смеси, м^3 .

Относительной влажностью φ воздуха называется отношение действительной абсолютной влажности ненасыщенного воздуха к максимально возможной абсолютной влажности воздуха при той же температуре, %,

$$\varphi = (\rho_{II} / \rho_{max}) \cdot 100 ,$$

где ρ_{max} – абсолютная максимально возможная влажность воздуха, равная плотности насыщенного пара, кг/м^3 .

Для идеальных газов отношение плотностей можно заменить отношением парциальных давлений. Поэтому

$$\varphi = (p_{II} / p_H) \cdot 100 ,$$

где p_H – давление насыщенного пара.

В двух последних формулах ρ_{max} и p_H находятся по таблицам состояния водяного пара для температуры влажного воздуха.

Влажностью влажного воздуха называют отношение массы $m_{\text{П}}$ водяного пара, содержащегося в некотором объеме влажного воздуха, к массе $m_{\text{В}}$ сухого воздуха, находящегося в том же объеме, г/кг

$$d = m_{\text{П}}/m_{\text{В}} = \rho_{\text{П}}/\rho_{\text{В}} .$$

Парциальное давление водяного пара во влажном воздухе можно определить по формуле

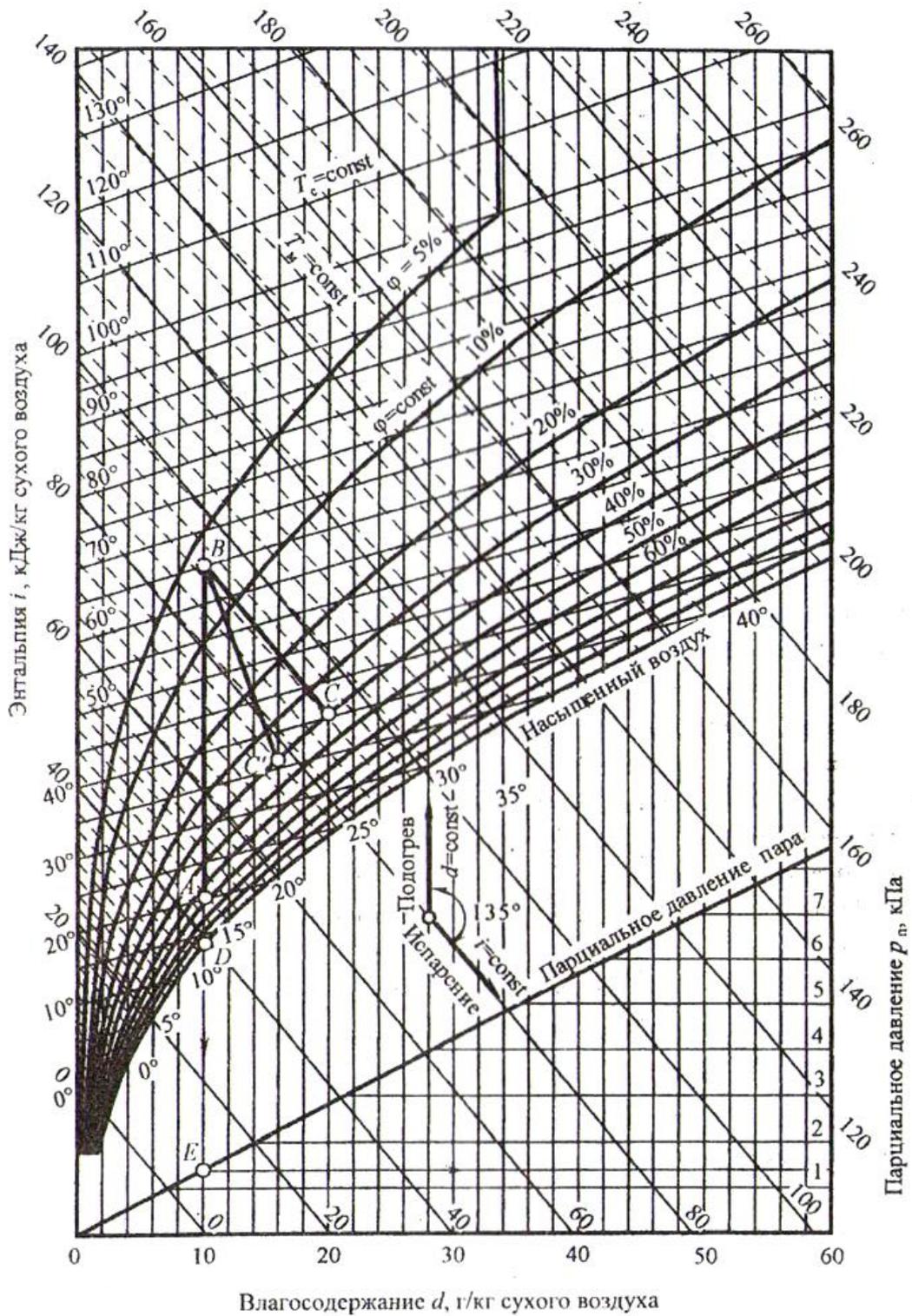
$$p_{\text{П}} = p d / (622 + d) ,$$

где d – влажность, г/кг; число 622 – отношение газовых постоянных воздуха и водяного пара, умноженное на 1000.

Если $p_{\text{П}} = p_{\text{Н}}$ при данной температуре, то влажность при состоянии насыщения на 1 кг сухого воздуха определяется из выражения

$$d_{\text{Н}} = 622 p_{\text{Н}} / (p - p_{\text{Н}}) .$$

Последнее уравнение показывает, что при $p_{\text{Н}} \rightarrow p$ $d \rightarrow \infty$; $d = \infty$ соответствует только водяному пару, а $d = 0$ – сухому воздуху. Относительная влажность ϕ окружающего воздуха наиболее точно определяется по показаниям *психрометра* и специальных таблиц. Психрометр состоит из двух термометров: “мокрого” и сухого. Шарик “мокрого” термометра обернут тканью, постоянно смачиваемой водой. Испарение влаги с поверхности шарика термометра приводит к его охлаждению, поэтому такой термометр всегда показывает более низкую температуру, чем сухой. По разности показаний сухого и “мокрого” термометров с помощью психрометрической таблицы (табл. 3 приложения) определяется относительная влажность. Более просто и быстро можно определять вышеперечисленные параметры влажного воздуха и его энтальпию h , а также проводить исследования термодинамических процессов с влажным воздухом с помощью h - d диаграммы (рис. 4.1), справедливой для давления $p = 99300$ Па



Влажесодержание d , г/кг сухого воздуха

Рис. 4.1. id -диаграмма влажного воздуха

(745 мм рт. ст.), соответствующего среднему годовому значению барометрического давления в центральных районах России.

В $h-d$ диаграмме по оси абсцисс откладывается влагосодержание d (г/кг сухого воздуха), а по оси ординат – удельная энтальпия h влажного воздуха (кДж/кг). По делениям оси абсцисс проведены вертикальные прямые постоянного влагосодержания ($d = \text{const}$). За начало удельных энтальпий принято нулевое значение, при котором $t = 0^\circ\text{C}$, $d = 0$ и $h = 0$.

При построении $h-d$ диаграммы для удобства расчета использована косоугольная система координат, так как при этом область ненасыщенного воздуха занимает большую площадь диаграммы. Через точки на оси ординат проводят линии $h = \text{const}$ под углом 135° к линиям $d = \text{const}$.

Кроме того, на диаграмму нанесены изотермы сухого ($t_c = \text{const}$) и “мокрого” ($t_m = \text{const}$) термометров и кривые относительной влажности ($\varphi = \text{const}$).

Линия с относительной влажностью $\varphi = 100\%$ называется линией насыщения, а точки на ней соответствуют состоянию насыщенного воздуха. Область диаграммы, расположенная выше линии насыщения, является областью ненасыщенного влажного воздуха, т. е. смеси сухого воздуха и перегретого пара. Ниже линии насыщения расположена область, в которой водяной пар, содержащийся в воздухе, является влажным насыщенным. На линии насыщения показания “мокрого” и сухого термометров одинаковые. В нижней части диаграммы нанесена линия зависимости парциального давления водяного пара от влагосодержания. Значения парциальных давлений отложены по правой вертикальной шкале диаграммы.

Определение параметров влажного воздуха по $h-d$ диаграмме производится следующим образом.

Относительная влажность воздуха. Предварительно определяется температура воздуха по сухому t_c и “мокрому” t_m термометрам. Затем на диаграмме находят точку пересечения изотерм t_c и t_m , определяющую состояние влажного воздуха, например, точка A , а по ней определяется искомая величина φ (в данном примере $\varphi = 70\%$).

Температура точки росы. Из точки, характеризующей состояние влажного воздуха (точка A), проводят вертикальную прямую $d = \text{const}$ до пересечения с линией насыщения $\varphi = 100\%$ (точка D). Изотерма сухого термометра, проходящая через данную точку, соответствует искомой температуре точки росы t_p (в данном примере $t_p = 14^\circ\text{C}$).

Парциальное давление водяного пара. Из исходной точки (точка A) проводится вертикальная прямая $d = \text{const}$ до пересечения с линией

парциального давления $p_{\Pi} = f(d)$ (точка E). Ордината этой точки по крайней правой шкале определяет значение p_{Π} (14 кПа).

Кроме определения параметров влажного воздуха $h-d$ диаграмма позволяет проводить исследования термодинамических процессов с влажным воздухом. Так, например, в процессе сушки какого-либо материала воздух предварительно подогревается в устройстве, называемом калорифером. При нагреве влагосодержание воздуха не меняется ($d_A = \text{const}$), поэтому процесс нагрева в $h-d$ диаграмме изображается вертикальной прямой (прямая AB) до пересечения в точке B с изотермой t_c , соответствующей температуре воздуха после нагрева. Процесс охлаждения влажного воздуха также изображается прямой $d = \text{const}$ от начальной точки (точка B) до конечной (точка A).

В сушильной камере за счет теплоты предварительно нагретого воздуха происходит испарение влаги из высушиваемого материала, вследствие чего влагосодержание воздуха увеличивается. На $h-d$ диаграмме линией BC изображен процесс сушки в идеальной камере, в которой отсутствуют тепловые потери в окружающую среду, теплота на нагрев материала не затрачивается и энтальпия воздуха в процессе сушки не меняется. Процесс сушки материалов в реальной сушилке всегда происходит с потерями и поэтому протекает с уменьшением энтальпии (линия BC').

Экспериментальная установка

Установка (рис. 4.2) состоит из калорифера для нагревания воздуха и камеры для его последующего увлажнения, которое осуществляется за счет испарения воды из смоченной хлопчатобумажной ткани. Воздух из помещения лаборатории, температура которого оценивается по показаниям t_{cA} сухого и t_{mA} “мокрого” термометров, образующих психрометр 5, подается вентилятором 7 через объемный расходомер 6 в калорифер 4, где подогревается до температуры $t_{cв}$, измеряемой термометром 2. Тепловая нагрузка электронагревателя 3 калорифера измеряется ваттметром и регулируется регулятором напряжения. Нагретый воздух проходит через камеру 8, внутри которой на металлическом каркасе 9 намотана хлопчатобумажная ткань 10, смачиваемая водой через воронку 1. Температура воздуха на выходе из установки измеряется с помощью сухого t_{cC} и “мокрого” t_{mC} термометров.

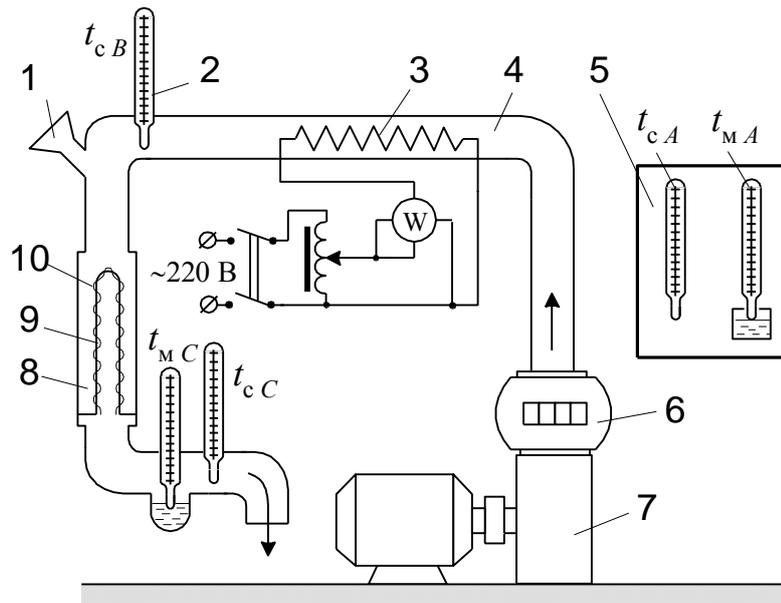


Рис. 4.2. Схема экспериментальной установки

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с описанием работы и опытной установкой.
2. Увлажнить ткань водой через воронку 1.
3. Определить с помощью психрометра 5 температуру воздуха по сухому t_{cA} и “мокрому” t_{MA} термометрам на входе в установку.
4. Включить вентилятор и электронагреватель в электросеть. Регулятором напряжения установить мощность 200...250 Вт и дождаться прогрева воздуха в калорифере до установившейся температуры (приблизительно 40...42 °С), определяемой по термометру 5.
5. Провести замеры экспериментальных величин в течение 5 мин, регистрируя показания всех приборов в начале и в конце опыта.
Результаты измерений занести в протокол наблюдений (табл. 4.1).
6. По окончании эксперимента ручку регулятора напряжения поставить в нулевое положение, выключить регулятор и вентилятор из сети.
7. Определить давление атмосферного воздуха в лаборатории с помощью барометра и занести его в отчет.

Таблица 4.1

Протокол наблюдений

Номер опыта	Показания ваттметра W , Вт	Температура воздуха по показаниям термометров, °С					Показания расходомера воздуха, м ³		Объем воздуха, прошедшего через установку за 5 мин, м ³	Относительная влажность воздуха φ , %	
		на входе в калорифер		на выходе из калорифера t_{CB}	на выходе из установки		в начале опыта	в конце опыта		на входе φ_A	на выходе φ_C
		сухого t_{cA}	мокрого t_{mA}		сухого t_{cC}	мокрого t_{mC}					

Обработка экспериментальных данных

По средним значениям измеренных величин одного опыта нанести на hd -диаграмму точку, характеризующую исходное состояние влажного воздуха на входе в калорифер (по значениям t_{cA} и t_{mA} – точка A); процесс нагрева (вертикальная прямая AB , по значению t_{cB} – точка B); процесс насыщения воздуха влагой (прямая BC , по значениям t_{cC} и t_{mC} – точка C).

По $h-d$ диаграмме определить параметры для исходного состояния воздуха на входе в установку (точка A), на выходе из калорифера (точка B) и на выходе из увлажнительной камеры (точка C). Полученные результаты занести в табл. 4.2.

Таблица 4.2

Результаты обработки экспериментальных данных

Состояние воздуха	h , кДж/кг	d , г/кг	t , °С	p_p , кПа	φ , %
На входе в калорифер, точка A					
На выходе из калорифера, точка B					
На выходе из увлажнительной камеры, точка C					

Используя данные таблиц 4.1 и 4.2, вычислить следующие величины:
– количество теплоты, полученное воздухом в калорифере, кДж,

$$Q = W \tau \cdot 10^{-3} ,$$

где $\tau = 300$ с – продолжительность одного опыта;

– парциальное давление сухого воздуха на входе в калорифер и на выходе из него, кПа,

$$p_B = p_{\text{атм}} - p_{\text{п}} ,$$

где $p_{\text{атм}}$ – атмосферное давление в лаборатории, кПа;

– массу сухого воздуха, прошедшего за время опыта через увлажнительную камеру, кг,

$$m_B = \frac{p_B V}{R_B T} ,$$

где V – объем воздуха, прошедшего через калорифер за время опыта; R_B – газовая постоянная воздуха, $R_B = 287$ Дж/(кг·К); T – температура воздуха на выходе из калорифера, $T = t_{CB} + 273.15$ К.

– количество теплоты, затраченной на нагрев воздуха в калорифере, кДж,

$$Q_k = m_B (h_B - h_A);$$

– неучтенные потери теплоты в калорифере, кДж,

$$Q_{\text{пот}} = Q - Q_k;$$

– неучтенные потери теплоты в увлажнительной камере, кДж,

$$Q_c = m_B (h_B - h_c);$$

– количество теплоты, уходящей из установки с воздухом, кДж,

$$Q_{\text{уст}} = m_B (h_c - h_A);$$

– массу влаги, испаренной за время опыта, кг,

$$m_{\text{вл}} = m_B (d_C - d_A) \cdot 10^{-3} .$$

Вопросы и задания для самоконтроля

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 $p_{\text{п}} < p_{\text{н}}$?
5. Что называется температурой точки росы, абсолютной и относительной влажностью, влагосодержанием влажного воздуха?
6. Как определяются параметры влажного воздуха (h , $T_{\text{р}}$, d , $p_{\text{п}}$, 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?

Определение теплопроводности материалов

Лабораторная работа № 5

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.

Задание

1. Определить опытным путем значение коэффициента теплопроводности исследуемого материала и установить его зависимость от средней температуры.
2. Построить график зависимости $\lambda = f(T_{\text{ср}})$.
3. Оформить отчёт по работе со всеми расчётами и сделать выводы.

Основные понятия

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**.

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:

$$\Phi = -\lambda \frac{T_1 - T_2}{\delta} F, (Вт) \quad (1)$$

где λ - коэффициент теплопроводности материала пластины, $\frac{Вт}{м \cdot К}$,
 T_1, T_2 - средние температуры наружной и внутренней поверхностей пластины, (К);

δ - толщина пластины, м,

F – площадь поверхности пластины, м².

Формула (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 n или пространства в некоторый момент времени называется температурным полем.

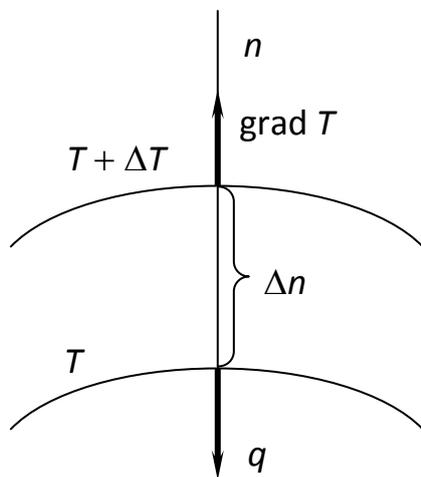
Температурное поле может быть нестационарным (изменяющимся во времени) и стационарным (не изменяющимся во времени). В зависимости от распределения температуры по направлениям различают одно-, двух- или трехмерные температурные поля.

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 (рис. 5.1), К /м:

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



Температурный градиент это вектор, направленный в сторону возрастания температуры.

В основе теории теплопроводности лежит закон Фурье, устанавливающий, что плотность q теплового потока, передаваемого теплопроводностью, прямо пропорциональна градиенту температуры, Вт/м²:

$$q = -\lambda \text{grad} T .$$

Рис. 5.1. Схема к определению градиента температуры

Плотность теплового потока – это количество теплоты, проходящее через единицу площади поверхности в единицу времени; коэффициент пропорциональности λ называется коэффициентом теплопроводности материала. В интегральной форме тепловой поток из закона Фурье определится, Вт,

$$\Phi = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} F .$$

Из этого уравнения значение коэффициента теплопроводности определяется соотношением

$$\lambda = - \frac{\Phi}{\frac{\partial T}{\partial n}} F, \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К}).$$

Коэффициент теплопроводности численно равен количеству теплоты, проходящей через единицу поверхности в единицу времени при температурном градиенте, равном единице.

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 $2 \leq \lambda \leq 450 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$. Для большинства чистых металлов с повышением температуры коэффициент теплопроводности уменьшается;

– для газов $0,006 \leq \lambda \leq 0,1 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$, причем с повышением температуры коэффициент теплопроводности возрастает;

– для жидкостей $0,1 \leq \lambda \leq 0,7 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$. При повышении температуры коэффициент теплопроводности, как правило, уменьшается;

– для большинства строительных неметаллических материалов $0,023 \leq \lambda \leq 2,9 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$. Материалы, у которых $\lambda < 0,25 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$, 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.

Экспериментальная установка

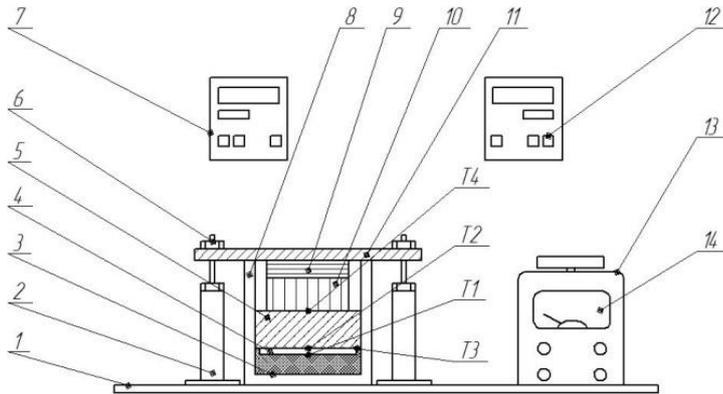


Рис. 5.2. Схема экспериментальной установки:

1 – основание, 2 – стойка монтажная, 3 – нижняя прослойка пенопласта, 4 – нагреватель, 5 – испытуемый образец, 6 – прижимные гайки, 7, 12 – измерители ТРМ 200, 8 – теплоизолирующий кожух, 9 – вентилятор, 10 – радиатор, прижимная пластина, 11 – прижимная пластина, 13 – ЛАТР, 14 – измеритель напряжения на выходе ЛАТРа.

Используемая в эксперименте установка (рис. 5.2) 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 T_1 закреплена на корпусе нагревателя сверху, T_2 – снизу на образце, T_3 – со стороны нагревателя у боковой стенки образца, T_4 – в центре с холодной стороны образца. Температуры T_1 и T_2 выводятся на измеритель ТРМ 200, расположенный слева (7) (T_1 - красный дисплей, T_2 - зеленый), а температуры T_3 и T_4 соответственно на измерителе справа (12) (T_3 - красный дисплей, T_4 - 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» подключается мультиметр для более точной фиксации напряжения подаваемого на нагреватель. Сигналы с термопар в режиме реального времени отображаются на измерителях ТРМ 200.

Порядок выполнения работы

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 $ВК_1$ и $ВК_2$.

4. Вывести на экран лицевую панель лабораторной работы «Теплопроводность изоляционных материалов» (рис. 5.3), 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 напряжение $U = 10$ В.
7. Наблюдать в течение 600 секунд изменения показаний датчиков температуры $T_1 - T_4$ на цифровых индикаторах и многоканальном осциллографе на лицевой панели компьютерной системы измерения, после чего записать данные в табл.1.

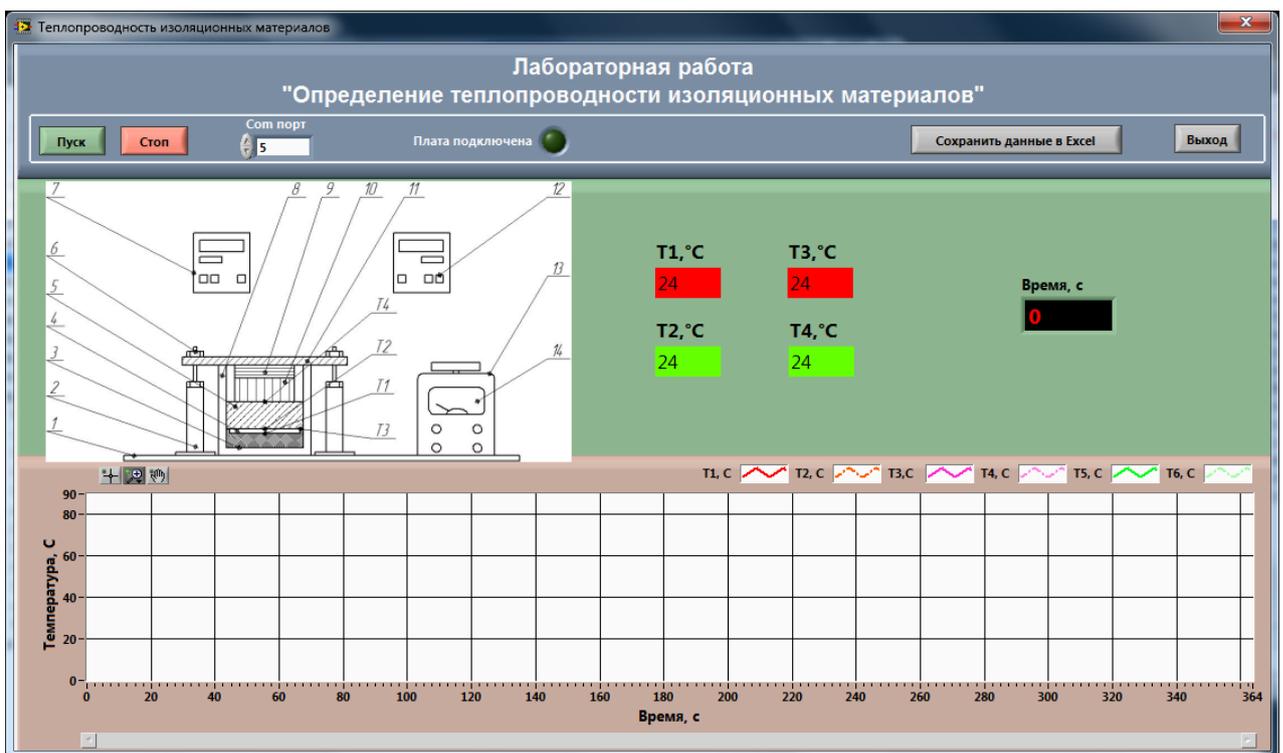


Рис. 5.3. Интерфейс программы

8. Установить последовательно напряжение автотрансформатора равное 20 В, затем 25 В и повторить пункт 7, выполнив замеры температур через 600,1300 и 2100 секунд соответственно.
9. Произвести вычисления согласно разделу «Обработка результатов».

10. Построить график $\lambda = f(T_{\text{ср}})$ для трех режимов, где: $T_{\text{ср}} = \frac{T_2 + T_3 + T_4}{3}$ – 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.

Обработка результатов

1. Определить площадь поверхности образца $F = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$, м².
2. Определить коэффициент формы образца

$$C = \frac{\delta}{F}, \text{ м}^{-1}.$$

δ - толщина образца, м.

3. Тепловой поток от нагревателя

$$\Phi = \frac{U^2}{R}, \text{ Вт}$$

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:

$$T_{\text{ср.н.п.}} = \frac{T_2 + T_3}{2}, \text{ К}$$

5. Для каждого из трёх режимов рассчитать коэффициент теплопроводности:

$$\lambda = C \frac{\Phi}{T_{\text{ср.н.п.}} - T_4}, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$$

где $T_{\text{ср.н.п.}}$ - средняя температура нижней поверхности образца, К

T_4 – температура холодной поверхности образца, К.

6. Вычислить среднюю температуру образца

$$T_{\text{ср}} = \frac{T_{\text{ср.н.п.}} + T_4}{2}$$

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

Результаты обработки результатов записать в табл. 5.1.

Учитывая, что образец находится в термостатирующей оболочке с откачанным воздухом, радиальными тепловыми потерями можно пренебречь.

Таблица 5.1

Параметры процесса

№ п/п	U, В	τ , с	t_1 ,	T_1	t_2 ,	T_2	t_3 ,	T_3	t_4 ,	T_4	$\lambda, \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$
			$^{\circ}\text{C}$	К	$^{\circ}\text{C}$	К	$^{\circ}\text{C}$	К	$^{\circ}\text{C}$	К	
1	10										
2	20										
3	25										

Вопросы и задания для самоконтроля

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.
11. По какому закону изменяется температура в однослойных плоской и цилиндрической стенках?

12. Вывести уравнение теплопроводности через многослойные плоскую и цилиндрическую стенки.

13. Опишите устройство и работу лабораторной установки.

14. По какому закону изменяется коэффициент теплопроводности в зависимости от температуры для теплоизоляционных материалов и металлов? Объяснить эти изменения.

Лабораторная работа № 6

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОТДАЧИ ТРУБЫ ПРИ СВОБОДНОЙ КОНВЕКЦИИ

Цель работы. Углубление знаний по теории теплообмена, усвоение понятий теплоотдачи и коэффициента теплоотдачи. Ознакомление с методом экспериментального определения коэффициента теплоотдачи трубы при горизонтальном и вертикальном ее положениях в свободном воздухе,

приобретение навыков в обработке опытных данных и представлении их в критериальной форме.

Задание:

1. Экспериментально определить значение коэффициента теплоотдачи трубы при различных ее пространственных положениях в условиях свободной конвекции.

2. Установить зависимость коэффициента теплоотдачи от температурного напора.

3. Составить критериальное уравнение теплообмена, определить из него теоретическое значение коэффициента теплоотдачи и сравнить его с экспериментальным.

4. Составить отчет.

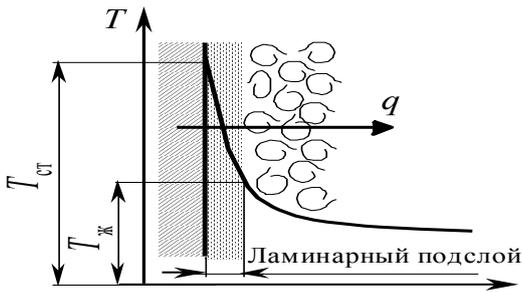


Рис. 6.1. Ламинарный пристеночный слой

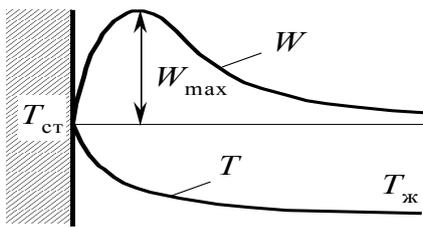


Рис. 6.2. Изменение температуры и скорости жидкости

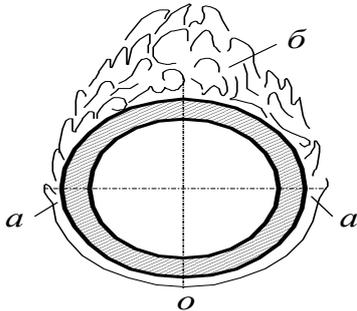


Рис. 6.3. Характер движения воздуха около нагретой трубы

Основные понятия

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 рис. 6.1, 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 (рис. 6.2).

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 рис. 6.3. Как видно, ламинарный слой a начинается от нижней точки o , далее по мере движения его толщина увеличивается, характер потока изменяется до тех пор, пока он не становится турбулентным (зона b).

При практических расчетах теплоотдачи используют закон Ньютона-Рихмана в виде

$$\Phi = \alpha F(T_{ст} - T_{ж}),$$

где Φ – тепловой поток от стенки к жидкости, Вт; F – площадь поверхности теплообмена, m^2 , α – коэффициент теплоотдачи, $Вт/(m^2 \cdot K)$. В общем случае коэффициент теплоотдачи представляет собой сумму коэффициентов теплоотдачи конвекцией $\alpha_{к}$ и излучением $\alpha_{л}$, т. е. $\alpha = \alpha_{к} + \alpha_{л}$; $T_{ст}$ – температура стенки (поверхности твердого тела); $T_{ж}$ – температура жидкости вдали от стенки. Разность температур стенки и жидкости $\Delta T = T_{ст} - T_{ж}$ 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 α возможно только для простейших случаев. Основным способом определения коэффициента теплоотдачи является эксперимент, а для описания закономерностей процесса теплоотдачи используют аппарат теории подобия физических процессов.

Теория подобия представляет собой учение о подобных явлениях. Простые физические явления называются подобными, если они происходят в

геометрически подобных системах, а отношения одноименных величин во всех сходственных точках системы есть постоянные числа. Эти числа называют константами подобия.

Подобные между собой явления имеют одинаковые *критерии* подобия. Последние являются безразмерными комплексами, составленными из величин, характеризующих явление. Критерии теплового подобия получают из дифференциальных уравнений движения жидкости, уравнений сплошности, энергии потока жидкости и теплообмена на границе твердого тела с окружающей средой.

Зависимость между переменными, характеризующими какой-либо процесс, может быть представлена в виде зависимости между определяемым критерием подобия и другими (определяющими) критериями. Такая зависимость называется уравнением подобия или критериальным уравнением.

В *определяемые* критерии входят искомые зависимые переменные.

Определяющие критерии составлены из независимых переменных или постоянных величин, входящих в условия однозначности. Такая зависимость называется уравнением подобия или критериальным уравнением. Критериальные зависимости для подобных между собой явлений одинаковы, так как для них критерии подобия имеют одно и то же значение.

Таким образом, если результаты какого-либо опыта обработать в критериальной форме, то полученная обобщенная зависимость будет справедлива для всех подобных между собой явлений. Её называют критериальным уравнением для данного физического явления.

Критерии называются именами ученых, плодотворно работавших в данной области науки, и обозначаются первыми буквами их имен. При изучении конвективного теплообмена используются следующие критерии:

– Нуссельта
$$Nu = \alpha_K l / \lambda_{ж}, \quad (8.1.)$$

где α_K – коэффициент конвективной теплоотдачи, Вт/(м²·К), l – определяющий линейный размер, от которого зависит развитие процесса. Для горизонтально расположенных труб определяющим размером является их наружный диаметр, м, для вертикально расположенных труб – их высота, м; $\lambda_{ж}$ – коэффициент теплопроводности жидкости, Вт/(м·К).

Критерий Нуссельта является определяемым, так как в него входит *искомая* величина α_K . Он характеризует теплообмен на границе “стенка – жидкость”,

– Рейнольдса
$$Re = Wl / \nu,$$

где W – скорость движения жидкости, м/с; ν – коэффициент кинематической вязкости жидкости, м²/с. Критерий Рейнольдса определяет характер течения жидкости и характеризует соотношение сил инерции и вязкости в потоке;

$$\text{– Грасгоффа} \quad Gr = gl^3\beta\Delta T/\nu^2, \quad (8.2.)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с²; l – определяющий размер, м; ν – коэффициент кинематической вязкости жидкости, м²/с; β – коэффициент теплового объемного расширения жидкости, 1/К; ΔT – температурный напор (разность температур жидкости и омываемой ею поверхности), К. Критерий Грасгофа характеризует подъемную силу, возникающую в жидкости вследствие разности плотностей нагретых и холодных ее частиц;

$$\text{– Прандтля} \quad Pr = \nu/a,$$

где a – коэффициент температуропроводности жидкости, м²/с. Критерий Прандтля составлен из физических параметров жидкости и является ее теплофизической характеристикой.

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

$$Nu = cRe_{ж}^n Pr_{ж}^m (Pr_{ж}/Pr_{ст})^{0,25}. \quad (8.3)$$

При *свободной конвекции* для расчета рекомендуется следующее критериальное уравнение:

$$Nu_{d,h} = c(Gr_{d,h} \cdot \text{Pr}_{d,h})^{0,25}, \quad (8.4)$$

где c – постоянный коэффициент, величина которого зависит от пространственного положения трубы. Для горизонтальной трубы $\tilde{n} = 0,61$, для вертикальной $\tilde{n} = 1,26$. Уравнение (8.3) может применяться при условии $10^3 < (Gr_{d,h} \cdot \text{Pr}_{d,h}) < 10^{10}$.

В уравнении (8.3) индексы d и h указывают, какой именно геометрический размер должен являться определяющим при вычислении критериев Нуссельта Грасгоффа и Прандтля (т.е. диаметр или высота трубы в зависимости от ее положения в пространстве).

Экспериментальная установка

Схема экспериментальной установки показана на рис. 6.4. Две одинаковые по размерам металлические трубы 3 и 6 установлены одна в вертикальном, другая - в горизонтальном положении. Внутри труб находятся нагревательные элементы, получающие питание от электрической сети через регулятор напряжения 1. Мощность теплового потока измеряется ваттметром

2; последний показывает тепловую мощность, рассеиваемую в *каждой из труб*.

Для измерения температуры наружной поверхности труб на каждой из них закреплены по три термопары, подсоединенные через переключатель 4 к показывающему прибору – милливольтметру 5. При позициях 1, 2, 3 к показывающему прибору подсоединяются термопары, расположенные на горизонтальной трубе, при позициях 4, 5, 6 - на вертикальной.

Температура t_e воздуха вдали от трубы измеряется термометром, находящимся на стене лабораторного помещения.

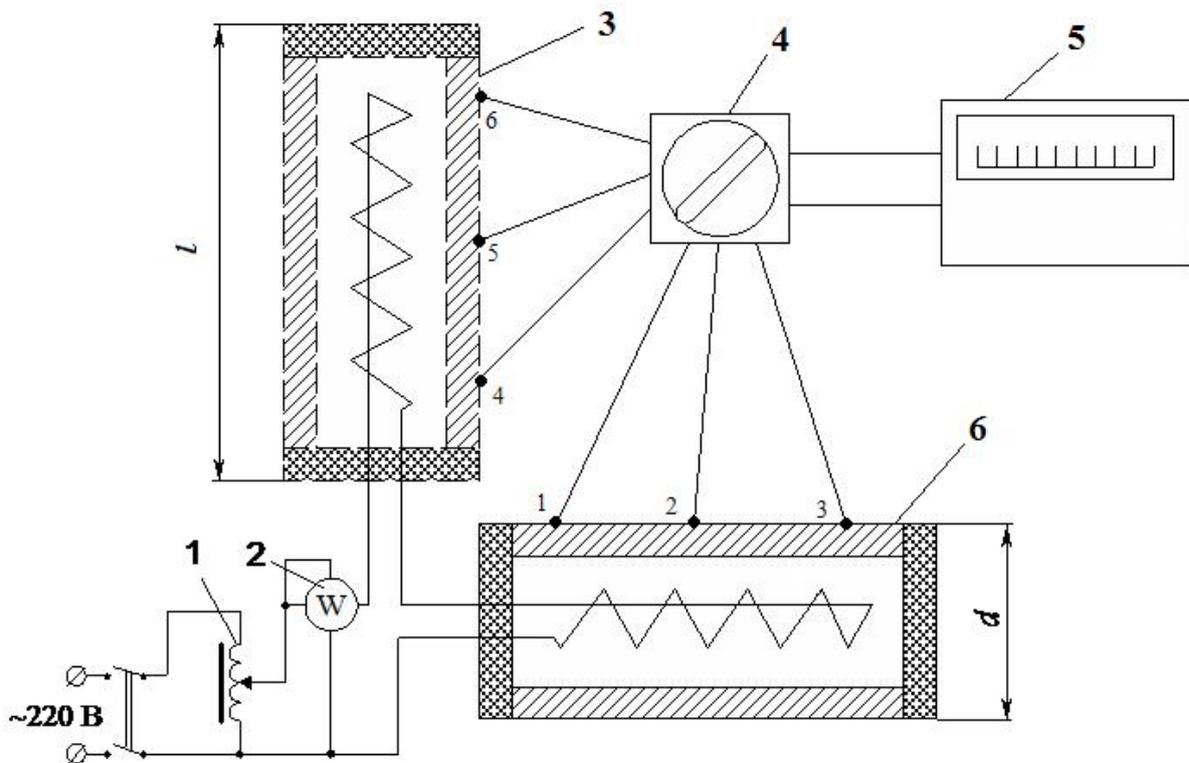


Рис. 6.4. схема экспериментальной установки

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться со схемой установки, ее устройством.
2. Включить установку в электрическую сеть. Величина мощности нагревателей устанавливается *по указанию преподавателя*. Переключателем 5 подключить к показывающему прибору любую из термопар.
3. Дать установке прогреться до установившегося теплового состояния (УТС), о чем будет свидетельствовать прекращение возрастания температуры.
4. После достижения УТС выполнить трехкратно с интервалом 5 мин измерение мощности нагревателей, температуры обеих труб по всем 6 термопарам и температуры окружающего воздуха. По результатам замеров

5. убедиться в постоянстве теплового состояния установки. Результаты всех измерений записывать в протокол наблюдений (табл. 6.1. и 6.2). Заполнять колонки 1, 2, 3, 4, 6.

6. Выключить установку из сети.

Таблица 6.1

**Протокол наблюдений
(Труба горизонтальная)**

№ опыта	Показания ваттметра W, Вт	Показания термопар, °С			Температура поверхности трубы средняя, К	Температура воздуха в помещении, °С	Температурный напор ΔT, К
		t_1	t_2	t_3	T_{cp}	t_e	
	1	2	3	4	5	6	7
1.							
Труба вертикальная							
1.							

Обработка экспериментальных данных

Все значения температур перевести в систему Си.

Выполнить следующие вычисления для каждой из труб (горизонтальной и вертикальной) по результатам третьего измерения(опыта) :

1. Найти среднюю температуру поверхности трубы T_n как среднее арифметическое показаний всех трех термопар, а также температурный напор

2. $\Delta T = T_n - T_e$. Полученные данные занести в колонки 5 и 7 протоколов наблюдений.

3. Вычислить общий коэффициент теплоотдачи α_Σ от поверхности трубы к окружающей среде по уравнению:

$$\alpha_\Sigma = \Phi / [F \cdot \Delta T], \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}),$$

где $\Phi = W$ – тепловой поток, Вт; $F = \pi D l$ – площадь поверхности трубы, м². Полученный по этому уравнению коэффициент теплоотдачи представляет собой сумму коэффициентов теплоотдачи конвекцией α_k и излучением $\alpha_{\text{л}}$.

4. Вычислить коэффициент теплоотдачи излучением по формуле:

$$\alpha_{\text{л}} = \varepsilon C_0 \left[\left(\frac{T_n}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_e}{100} \right)^4 \right] / \Delta T, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}),$$

где ε – степень черноты поверхности трубы, равная 0,25; C_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела, равный 5,77 Вт/(м²·К⁴).

4. Определить экспериментальное значение коэффициента теплоотдачи конвекцией:

$$\alpha_k^{\text{эксп}} = \alpha_{\Sigma} - \alpha_{\text{л}}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

5. Найти коэффициент теплоотдачи конвекцией *расчетным* путем, для чего сначала по уравнению (8.2) вычислить значение критерия Грасгофа, затем по уравнению (8.4) – значение критерия Нуссельта, а далее – из уравнения (8.1) – исходную величину $\alpha_k^{\text{расч}}$.

Физические константы воздуха, входящие в расчетные формулы, выбираются по табл. 4 приложения. Определяющей температурой воздуха является температура вдали от стенки, т. е. T_e . Значение критерия Прандтля принять равным 0,7. Определяющий размер – для горизонтальной трубы – ее диаметр; для вертикальной – высота. Коэффициент объемного расширения воздуха $\beta = 1/(T_e)$.

Результаты обработки опытных данных занести в табл. 6.3.

Сравнить коэффициенты конвективной теплоотдачи, полученные экспериментально ($\alpha_k^{\text{эксп}}$) и расчетным путем ($\alpha_k^{\text{расч}}$).

Таблица 6.3

Результаты обработки экспериментальных данных

Номер опыта	Φ , Вт	α_{Σ}	$\alpha_{Л}$	$\alpha_{к}^{эксп}$	$\lambda_{в,}$	ν , м ² /с	$Nu_{d,h}$	$Gr_{d,h}$	$Gr_{d,h} \cdot Pr_{d,h}$	$\alpha_{к}^{расч}$, Вт/(м ² ·К)
		$\frac{Вт}{м^2 \cdot К}$			$\frac{Вт}{м \cdot К}$					
труба – горизонтальная										
1.										
труба вертикальная										
2.										

Вопросы и задания для самоконтроля

1. Что называется конвективным теплообменом?
2. Дать определение коэффициента теплоотдачи.
3. Какая зависимость называется критериальным уравнением?
4. Какой вид имеет критериальное уравнение для теплоотдачи при свободной конвекции?
5. Какие стороны физических явлений характеризуют критерии Рейнольдса Re, Нуссельта Nu, Грасгофа Gr и Прандтля Pr ?
6. Что называется определяемым критерием подобий?
7. Что называется определяющим критерием подобия?
8. Что характеризуют граничные условия третьего рода?
9. Как устроена экспериментальная установка?
10. Что выражает уравнение Ньютона-Рихмана?
11. От каких факторов зависит коэффициент теплоотдачи?
12. Каков характер движения воздуха около нагретой горизонтальной трубы?
13. Почему величина коэффициента конвективной теплоотдачи зависит от пространственного положения трубы?

Лабораторная работа № 7

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОТДАЧИ
ОРЕБРЕННОЙ ПОВЕРХНОСТИ**

Назначение работы. Экспериментальное определение КПД оребрения и среднеинтегрального коэффициента теплоотдачи оребренной поверхности.

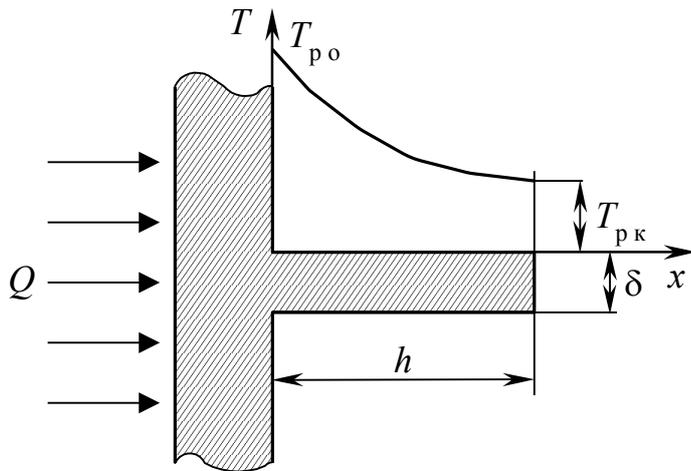


Рис. 7.1. Распределение температуры по ребру

Основные понятия

Оребрение поверхностей для интенсификации теплообмена применяется в двигателях внутреннего сгорания с воздушным охлаждением, при конструировании теплообменных аппаратов в теплоэнергетике и во многих других теплотехнических устройствах.

Рассмотрим случай охлаждения какой-либо поверхности омываемой её газом (жидкостью). Тепловой поток, отводимый жидкостью или воздухом от поверхности в общем случае определяется выражением, Вт

$$\Phi = \alpha F (T_{cp} - T_e),$$

где α – средний коэффициент теплоотдачи для всей поверхности (среднеинтегральный), Вт/(м²·К); F – площадь поверхности, м²; T_{cp} – среднеинтегральная температура поверхности, К; T_e – температура воздуха вдали от поверхности, К.

Часто требуется интенсифицировать теплоотдачу, не изменяя температурные уровни поверхности и охлаждающей жидкости или воздуха. В этом случае желательный эффект достигают обычно увеличением площади поверхности теплообмена или размещением на основной (несущей) поверхности ребристых элементов различной конфигурации.

Рассмотрим применительно к данной работе случай размещения прямолинейных ребер постоянной толщины на плоской несущей пластине, омываемой воздухом.

На рис. 7.1 приведена схема распределения температуры по такому ребру, из которой видно, что по высоте ребра температура уменьшается от значения T_{po} у основания ребра до значения T_{pk} на вершине ребра вследствие отвода теплоты по всей его поверхности.

Очевидно, что высота ребра h должна быть такой, чтобы существовала не нулевая разность между температурой вершины ребра T_{pk} и температурой омывающего ребро воздуха T_e . В противном случае конечная часть ребра не

будет “работать” в тепловом отношении, что приведет к бесполезному расходу металла.

Тепловой поток Φ , отводимый от оребренной поверхности омываемой воздухом, определяется из выражения:

$$\Phi = \alpha F_{op} (T_{ncp} - T_{\epsilon}), \text{ Вт},$$

где α – среднеинтегральное значение коэффициента теплоотдачи от оребренной поверхности к жидкости, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; F_{op} – площадь оребренной поверхности теплообмена, м^2 ; T_{ncp} – среднеинтегральная температура оребренной поверхности, К ; T_{ϵ} – температура воздуха, К . В практике расчетов возникает достаточно сложная задача определения величины T_{ncp} , поэтому часто пользуются не вышеприведенной формулой, а ее модификацией:

$$\Phi = \alpha F_{op} E_n (T_{nn} - T_{\epsilon}) \quad (8.1)$$

В этой формуле величина E_n равна

$$E_n = (T_{ncp} - T_{\epsilon}) / (T_{nn} - T_{\epsilon})$$

Она называется КПД оребрения и показывает, во сколько раз применение ребер снижает температурный напор между несущей поверхностью и омывающей ее жидкостью; T_{nn} – температура поверхности несущей.

КПД оребрения поверхности может быть также выражен формулой:

$$E_n = E_p + (1 - E_p) / \beta, \quad (8.2)$$

в которой $\beta = F_{op} / F_{nn}$ – степень оребрения, равная отношению величины всей площади оребрения F_{op} к площади несущей поверхности без ребер F_{nn} ;

E_p – коэффициент эффективности ребра (КПД ребра), определяемый по формуле:

$$E_p = (T_{pcp} - T_{\epsilon}) / (T_{nn} - T_{\epsilon}), \quad (8.3)$$

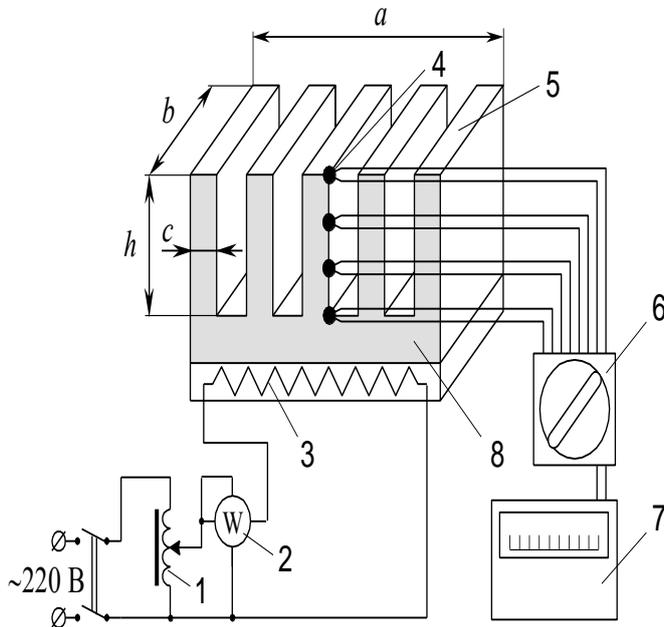


Рис. 7.2. Схема установки

где T_{pcp} – температура ребра средняя в процессе опыта.

КПД ребра E_p показывает, во сколько раз температурный напор между ребром и омываемого его воздухом меньше температурного напора между несущей поверхностью и воздухом.

Экспериментальная установка

Схема установки приведена на рис. 7.2. Несущая пластина 8 имеет плоские ребра 5. Степень оребрения такой поверхности

$$\beta = \frac{F_{op}}{F_{nh}} = (ab + 2nhb + 2nhc)/(ab), \quad (8.4)$$

где n – количество ребер. На центральном ребре установлены (зачеканены) четыре термопары 4, размещенные следующим образом: одна термопара находится на несущей поверхности (у основания ребра), другая – на конце ребра, а между ними на равных расстояниях установлены еще две термопары. Термопары переключателем 6 соединяются с показывающим прибором – автоматическим потенциометром 7.

На поверхности несущей пластины, свободной от ребер, размещен плоский электронагреватель 3, мощность которого устанавливается регулятором напряжения 1 и измеряется ваттметром 2. Установка оснащена вентилятором для принудительного обдува оребренной поверхности (на схеме не показан). Температура окружающего воздуха измеряется лабораторным термометром.

Порядок выполнения работы

1. Включить установку (вентилятор обдува не включать). Мощность нагревателя устанавливается по указанию преподавателя.
2. Дождаться выхода установки на установившееся тепловое состояние (УТС), о чем свидетельствует прекращение возрастания температуры оребрения пластины.

3. После достижения УТС выполнить замеры следующих величин: температуры по всем термопарам и воздуха в помещении, мощности нагревателя.

4. Все замеры провести трехкратно с интервалом между ними 5 мин. Результаты измерений занести в протокол наблюдений.

Протокол наблюдений

Условия и номер замера		Q, Вт	Температура, °С						E _p	E _n	α, Вт/(м ² ·К)
			t _{нн}	t ₂	t ₃	t _{рê}	t _{дñä}	t _æ			
Без обдува	1										
	2										
	3										
С обдувом	1										
	2										
	3										

Обработка экспериментальных данных

1. Определить среднюю температуру ребра

$$T_{\text{ср}} = (T_{\text{нн}} + T_2 + T_3 + T_{\text{рк}})/4$$

2. Используя уравнение (8.4), определить параметры исследуемой поверхности F_{op} , $F_{нн}$, β .
3. Определить КПД ребра E_p и КПД оребрения E_n соответственно по уравнениям (8.3) и (8.2).
4. Определить коэффициент теплоотдачи α оребренной поверхности по уравнению (8.1). Результаты расчета занести в таблицу.
5. Включить вентилятор, дождаться выхода установки на новое УТС и повторить эксперимент по пунктам 3-7 (при включенном вентиляторе).
6. Написать отчет и сделать выводы по результатам работы.

Вопросы и задания для самоконтроля

1. Единица измерения коэффициента теплоотдачи.

2. Что называется коэффициентом эффективности оребрения поверхности? Его физический смысл.
3. Что такое КПД ребра? Его физический смысл.
4. Как влияет обдув оребренной поверхности на показатели теплоотдачи?
5. Почему слишком длинное ребро неэффективно в тепловом отношении? Что такое степень оребрения?
6. Зачем необходимо оребрение поверхностей теплообмена?
7. Как записывается уравнение Ньютона-Рихмана для оребренной поверхности? Единица измерения теплового потока.
8. Назовите способы повышения интенсивности теплоотдачи.
10. Как экспериментально определить коэффициент теплоотдачи оребренной поверхности?

Лабораторная работа № 8. **ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА
ИЗЛУЧЕНИЕМ**

Цель работы. Изучение теплообмена излучением и определение степени черноты излучающего тела.

Задание.

1. Экспериментально определить коэффициент излучения и степень черноты различных тел.
2. Экспериментальное исследование зависимости степени черноты поверхностей от температуры излучающего тела.
3. Оформить отчёт по работе, построить графики зависимостей: $\epsilon_{\text{ч}} = f(T_{\text{ч}})$, $\epsilon_{\text{бел}} = f(T_{\text{бел}})$, $\epsilon_{\text{пол}} = f(T_{\text{пол}})$.

Основные понятия

Теплообмен излучением (лучистый, радиационный теплообмен), осуществляется в результате процессов превращения внутренней энергии вещества в энергию излучения, переноса энергии излучения и её поглощения веществом. Интенсивность этого обмена определяется взаимным расположением в пространстве тел, обменивающихся теплом, а так же свойствами поверхностей тел и среды, разделяющей эти тела. При этом любое тело, температура которого отлична от абсолютного нуля, испускает энергию,

обусловленную нагревом тела. Это излучение называется собственным излучением тела.

Теплообмен излучением осуществляется посредством электромагнитных волн. В камерах нагревательных печей на его долю приходится 90-95% суммарного теплообмена. Электромагнитные волны распространяются прямолинейно со скоростью света и подчиняются оптическим законам преломления, поглощения, отражения. Источником этих волн являются материальные частицы, входящие в состав вещества. Для распространения электромагнитных волн не требуется материальной среды. В вакууме они распространяются со скоростью света и характеризуются длиной волны λ или частотой колебаний ν . При температуре до 1500 °С основная часть энергии соответствует инфракрасному и частично световому излучению ($\lambda=0,7 - 50$ мкм).

В общем спектре инфракрасного излучения выделяют (ИК) область излучения ближней ИК-области ($\lambda=0,76 - 1,5$ мкм); средней (1,5 – 10 мкм) и дальней (10 – 1000 мкм). При температурах до 1800 °С основная доля мощности излучения приходится на инфракрасную область спектра, не видимую глазом человека.

Следует отметить, что энергия излучения испускается не непрерывно, а в виде определенных порций — квантов. Носителями этих порций энергии являются элементарные частицы излучения — фотоны, обладающие энергией, количеством движений и электромагнитной массой. При попадании на другие тела энергия излучения частично поглощается ими, частично отражается и частично проходит сквозь тело. Процесс превращения энергии излучения во внутреннюю энергию поглощающего тела называется поглощением. Большинство твердых и жидких тел имеют сплошной спектр излучения. Газы испускают энергию только в определенных интервалах длин волн (селективный спектр излучения). Твердые тела излучают и поглощают энергию поверхностью, а газы — объемом.

Излучаемая в единицу времени энергия в узком интервале изменения длин волн $\Delta\lambda$ называется потоком монохроматического излучения Q_λ . Поток излучения, соответствующий всему спектру, называется интегральным, или полным, лучистым потоком Q (Вт). Интегральный лучистый поток, излучаемый с единицы поверхности тела по всем направлениям полусферического пространства, называется плотностью интегрального излучения (Вт/м²).

С квантовой точки зрения излучение представляет собой поток фотонов, энергия которых равна $h\gamma$, где $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка и γ – частота колебаний эквивалентного электромагнитного поля. Длина волны связана с частотой соотношением $\gamma\lambda = c$, где c – скорость распространения колебаний (в вакууме $c = 3 \cdot 10^8$ км/с).

Для нас наибольший интерес представляет излучение, интенсивность которого определяется только температурой и оптическими свойствами излучающего тела. Такими свойствами обладают световое и инфракрасное излучения, т. е. излучение с длиной волны приблизительно от 0,4 до 800 мкм. Эти лучи называют тепловыми, а процесс их распространения – тепловым излучением или радиацией. Твердые тела излучают теплоту со свободной поверхности, а газообразные – из всего объема. Теплообмен излучением между твердым телом и жидкостью с одной стороны, и газообразным веществом, способным к тепловому излучению (обычно это смеси многоатомных газов), с другой, возможен непосредственно при их соприкосновении друг с другом. Суммарное излучение, проходящее через произвольную поверхность в единицу времени, называется потоком излучения Q или лучистым потоком. Лучистый поток, излучаемый с единицы

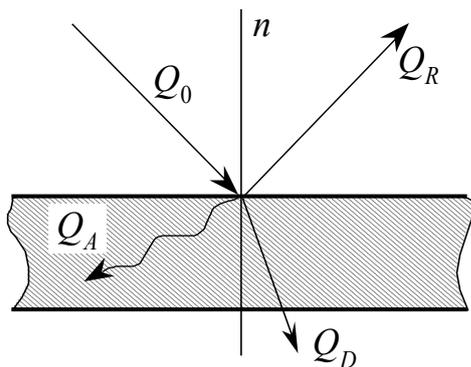


Рис. 8.1. Распределение энергии, падающей на тело

поверхности по всем направлениям полусферического пространства, называется плотностью потока излучения или интегральным излучением E .

Отношение плотности потока излучения к длине волны называется интенсивностью излучения $dl = dE / d\lambda$.

Если из всего количества энергии Q_0 , падающей на тело, часть Q_A поглощается, часть Q_R отражается и часть Q_D проходит сквозь тело (рис. 8.1) так, что

$Q_A + Q_R + Q_D = Q_0$, то, разделив обе части этого равенства на Q_0 , получим:

$$\frac{Q_A}{Q_0} + \frac{Q_R}{Q_0} + \frac{Q_D}{Q_0} = 1$$

или

$$A + R + D = 1,$$

где A характеризует поглощательную, R – отражательную и D – пропускающую способность тела. Значения A , R и D зависят от природы вещества, температуры тела и спектра падающего излучения.

Если $A = 1$, то $R = 0$ и $D = 0$, и вся падающая лучистая энергия полностью поглощается телом. Такие тела называются абсолютно черными.

Если $R = 1$, то $A = 0$ и $D = 0$, и вся падающая лучистая энергия полностью отражается. Если отражение соответствует законам геометрической оптики, тела называют зеркальными, если же отражение диффузное – абсолютно белыми.

Если $D = 1$, то $A = 0$ и $R = 0$, и вся падающая лучистая энергия полностью проходит сквозь тело. Такие тела называют абсолютно проницаемыми (прозрачными). Абсолютно черных, белых и проницаемых тел в природе нет; в применении к реальным телам эти понятия условны.

Сопоставляя энергии собственного излучения реального тела с энергией излучения абсолютно черного тела при той же температуре, получают характеристику тела, которая называется степенью черноты

$$\varepsilon = E/E_0,$$

где E – плотность потока излучения реального тела, Вт/м²; E_0 – плотность потока излучения абсолютно черного тела, Вт/м². Д. Стефан опытным путем, а Л. Больцман теоретически установили зависимость плотности потока излучения абсолютно черного тела от температуры

$$E_0 = \sigma_0 T^4,$$

где σ_0 – постоянная излучения Стефана-Больцмана. Для абсолютно черного тела $\sigma_0 = 5,77 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴).

Обычно в технических расчетах закон Стефана-Больцмана записывают в следующем виде:

$$E_0 = C_0 (T/100)^4,$$

где C_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела, равный 5,77 Вт/(м²·К⁴).

В применении к реальным телам этот закон имеет вид:

$$E = C (T/100)^4.$$

Для различных тел коэффициент излучения C различен. Его значение определяется природой тела, состоянием поверхности и температурой.

Величина C всегда меньше C_0 и может изменяться в пределах от нуля до $5,77 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$. Степень черноты ε реальных тел с использованием понятия коэффициента излучения определяется по следующей зависимости:

$$\varepsilon = C/C_0$$

Для лучистого теплообмена между двумя телами при стационарном режиме на основании закона Стефана-Больцмана

$$Q_{\text{л}} = q_{\text{л}} F = C_{\text{пр}} \left[(T_1/100)^4 - (T_2/100)^4 \right] F ,$$

где $q_{\text{л}}$ – плотность теплового потока, т. е. лучистый поток $Q_{\text{л}}$, отнесенный к единице расчетной поверхности излучения F , $\text{Вт}/\text{м}^2$, T_1 и T_2 – температуры поверхностей твердых тел, участвующих в теплообмене излучением, К ; $C_{\text{пр}}$ – приведенный коэффициент излучения двух тел, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$.

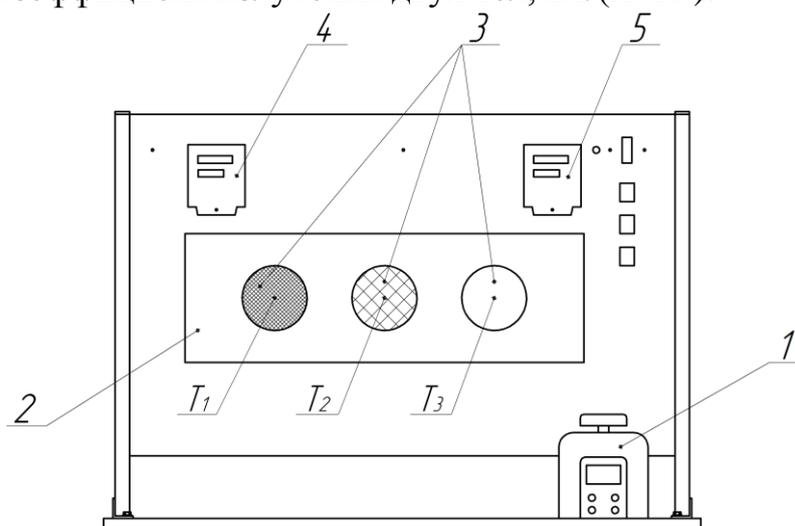


Рис. 8.2. Схема экспериментальной установки
1 – автотрансформатор (ЛАТР), 2 – щит 3 – мишени, 4 – цифровой измеритель ТРМ 200, 5 – цифровой измеритель ТРМ 200

Экспериментальная установка

Установка (рис. 8.2 и 8.3) представляет собой три тепловые мишени диаметром 165 мм – 180 мм (в зависимости от комплектации) с электронагревателями, последовательно включенными в электрическую цепь (рис. 8.4). Нагреватели имеют одну и ту же мощность, одинаковым образом расположены на лицевой панели установки. Они отличаются друг от друга лишь состоянием излучающей поверхности. Первая мишень имеет черную покрашенную поверхность, вторая – покрашенную белую, третья – полированную металлическую.

В центре каждой мишени с внутренней стороны нагревателя установлены хромель - копелевые термопары. Электрический сигнал от термопар подается на цифровые измерители температуры (2 и 5). В табл. 8.1 описаны сигналы, отображаемые на дисплеях измерителей. Сигнал с измерителей поступает в компьютер через преобразователь. Одновременно эта же температура с наружной стороны мишени может поочередно контролироваться с помощью инфракрасного термометра с лазерным указателем участка излучающей поверхности (8).

Таблица 8.1
Описание сигналов, отображаемых измерителями ТРМ 200

Измеритель	Индикатор	Примечание
ТРМ 200 – левый (поз. 4 на рисунке 1)	Красный	Температура поверхности черной мишени
ТРМ 200 – левый (поз. 4 на рисунке 1)	Зеленый	Температура поверхности белой мишени
ТРМ 200 – правый (поз. 5 на рисунке 1)	Красный	Температура поверхности полированной мишени
ТРМ 200 – правый (поз. 5 на рисунке 1)	Зеленый	Температура комнатная



Рис.8. 3. Общий вид установки

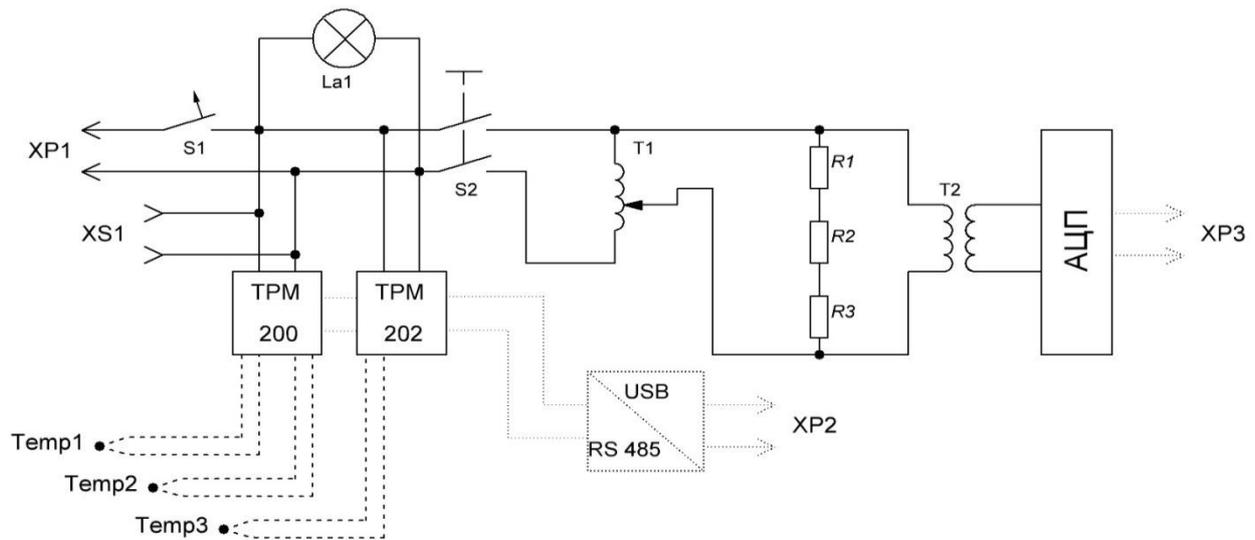


Рис. 8.4. Принципиальная электрическая схема стенда

XP1 – вилка для подключения стенда к сети 220 В / 50 Гц, заземление обязательно!

XP2, XP3 – вилка USB для подключения к компьютеру (протокол USB 1.1)

XS1 – розетка для подключения дополнительных приборов к сети 220 В / 50 Гц, располагается сзади стенда в белом коробе. Максимальная мощность 1,5 кВт. Используется для подключения компьютера (ноутбука) при работе со стендом.

S1 – автоматический однофазный выключатель, мощность 6А (10А, 16А или 25А) в зависимости от модели стенда установлен на лицевой панели стенда.

S2 – выключатель подачи питания к автоматическому трансформатору со встроенным индикатором (светодиод). На стенде расположен в лицевой панели с обозначением ВК1.

La1 – индикаторная лампа, загорается при подаче к стенду питания 220В с помощью автоматического выключателя S1.

T1 – автоматический автотрансформатор подает регулируемое напряжение (0-220В) к нагревателям мишеней стенда. Мощность 500 Вт, максимальный ток 2А.

T2 – понижающий трансформатор (220 – 9 В) измерения напряжения на мишенях, В.

R1, R2, R3 – нагреватели мишеней, общее сопротивление 98 Ом.

TPM 200 и 202 (200 в зависимости от комплектации) – измерители сигналов с термопар. Передача данных осуществляется по протоколу RS 485 с последующим преобразованием (преобразователь АС-4) и передачи данных в компьютер по протоколу USB.

Temp1...3 – термопары, установленные на обратной стороне мишеней для измерения температуры поверхности.

Порядок выполнения работы

1. Изучить методические указания, заготовить форму отчета о проведенной работе, в которую внести название и цель работы, основные сведения об изучаемых процессах, схему экспериментальной установки, заготовить табл. 2 для записи результатов измерений и вычислений.
2. Включить питание установки с помощью автомата «Сеть 220 В».
3. Включить компьютер (ноутбук) и запустить программу проведения лабораторной работы командами Пуск→ Программы→ MeasLAB→«ИК излучение» - на экране монитора должна появиться лицевая панель компьютерной системы измерения (рис.8.5).
4. На лицевой панели внести название сохраняемого файла, **изменить СОМ. ПОРТ с цифры 5 на 4** и запустить режим измерения кнопкой «Пуск». При этом загорится зелёный огонёк « плата подключена».
5. На ЛАТР установить напряжение 70 В.
6. Определить и зафиксировать в табл. 2 температуру окружающей среды $t_0, ^\circ\text{C}$

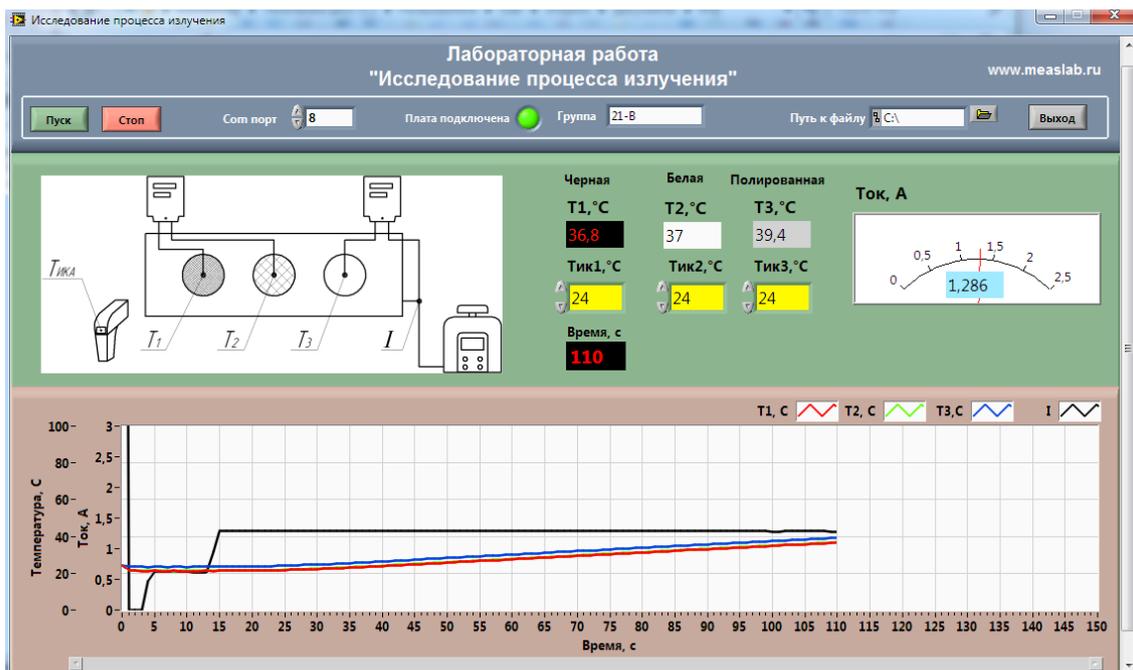


Рис.8.5 – Интерфейс панель программы

7. В течение 10 минут наблюдать на лицевой панели компьютерной системы изменения показания термопар (на многолучевом графике) T_1 – черной, T_2 – белой, T_3 – полированной мишеней, закрепленных с внутренней стороны мишеней. При установившемся режиме записать показания термопар и внести их значения в табл.8.2

8. Замерить показания термопар с помощью ИК-термометра, расположив его луч строго в центре каждой мишени и внести показания в табл.2.

9. Установить последовательно напряжение, равное 90 В и 100 В, повторив пункты 7 и 8.

10. Обработать полученные данные по всем мишеням и определить степень черноты ϵ и коэффициент излучения C для каждой из них при разных температурах поверхностей (при этом температура подставляется в формулы по шкале Кельвина).

Протокол наблюдений

Таблица 8.2.

№ п/п	Напряжение U, В	Тепловой поток Ф, Вт	Время, τ, с	Измеренные значения температур, °С						Степени черноты поверхностей			Коэффициент излучения, $\frac{Вт}{м^2 \cdot К^4}$			
				$t_{ч}$	$t_{ч,и.к}$	$t_{бел}$	$t_{бел,и.к}$	$t_{пол}$	$t_{пол,и.к}$	t_o	$\epsilon_{ч}$	$\epsilon_{бел}$	$\epsilon_{пол}$	$C_{о,ч}$	$C_{о,бел}$	$C_{о,пол}$
1	70															
2	90															
3	100															

Обработка опытных данных

1. Перевести значения измеренных температур в систему СИ.
2. Рассчитать степень черноты ϵ каждой поверхности для трех значений напряжения по формулам:

$$\varepsilon_{\text{ч}} = \frac{\left[\left(\frac{T_{\text{ч,и.к.}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_0}{100} \right)^4 \right]}{\left[\left(\frac{T_{\text{ч}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_0}{100} \right)^4 \right]}; \quad \varepsilon_{\text{бел}} = \frac{\left[\left(\frac{T_{\text{бел,и.к.}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_0}{100} \right)^4 \right]}{\left[\left(\frac{T_{\text{бел}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_0}{100} \right)^4 \right]};$$

$$\varepsilon_{\text{пол}} = \frac{\left[\left(\frac{T_{\text{пол,и.к.}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_0}{100} \right)^4 \right]}{\left[\left(\frac{T_{\text{пол}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_0}{100} \right)^4 \right]}.$$

где: $T_{\text{ч}}$, $T_{\text{бел}}$, $T_{\text{пол}}$ – температура черной, белой и полированной поверхностей соответственно, измеренные термопарой, К,

$T_{\text{ч,и.к.}}$, $T_{\text{бел,и.к.}}$, $T_{\text{пол,и.к.}}$ – температура черной, белой и полированной поверхностей, соответственно, измеренные ИК пирометром, К.

T_0 – температура окружающей среды (см. зеленый индикатор правого измерителя температуры), К.

3. Рассчитать тепловой поток Φ излучения по формуле, результаты занести в табл.2:

$$\Phi = \frac{U^2}{R}, \text{ Вт.}$$

где: U – величина напряжения, В; $R = 78 \text{ Ом}$ – общее сопротивление всех последовательно соединенных мишеней.

4. Рассчитать величину коэффициента излучения C по уравнению Стефана-Больцмана и результаты занести в табл.2:

$$C_{\text{о,ч}} = \frac{\Phi}{\varepsilon_{\text{ч}} S \left[\left(\frac{T_{\text{ч}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_0}{100} \right)^4 \right]}; \quad C_{\text{о,бел}} = \frac{\Phi}{\varepsilon_{\text{бел}} S \left[\left(\frac{T_{\text{бел}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_0}{100} \right)^4 \right]};$$

$$C_{\text{о,пол}} = \frac{\Phi}{\varepsilon_{\text{пол}} S \left[\left(\frac{T_{\text{пол}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_0}{100} \right)^4 \right]}.$$

где: S – площадь поверхности мишени, $S = \pi \cdot r^2$, м^2 r – радиус мишени, равный $0,16 \text{ м}$.

5. Построить графики зависимостей степени черноты исследованных поверхностей от температуры мишеней: $\epsilon_{\text{ч}} = f(T_{\text{ч}})$, $\epsilon_{\text{бел}} = f(T_{\text{бел}})$, $\epsilon_{\text{пол}} = f(T_{\text{пол}})$.
6. Сравнить результаты эксперимента со справочными данными.
 7. Ответить на контрольные вопросы и сделать самостоятельные выводы по результатам лабораторной работы.

Вопросы и задания для самоконтроля

1. Что такое тепловое излучение? Понятия потока излучения, плотности потока излучения и интенсивности излучения.
2. Понятие абсолютно черного, белого и прозрачного тела. Каковы факторы, влияющие на величину значений A , R , D ?
3. Для чего важно знать степень черноты тела? Перечислите факторы, влияющие на степень черноты тела. Закон Стефана-Больцмана.
4. Как изменится коэффициент излучения стали $C_{\text{ст}}$, если поверхность подвергнуть более тщательной механической обработке (например, отполировать наружную поверхность)?
5. Как уменьшить систематические погрешности измерений в эксперименте?
6. Сущность законов Планка, Вина, Кирхгофа.
7. Каковы различия между излучением твердых тел и газов?
8. Как соотносятся между собой скорости распространения тепла при передаче его теплопроводностью, свободной или вынужденной конвекцией и тепловым излучением?
9. Какие способы защиты от теплового излучения может предложить современная техника?
10. Что представляет собой экранно-вакуумная изоляция и чем объясняется ее эффективность?

Назначение работы. Изучение процесса теплопередачи, определение количества теплоты, получаемого помещением от прибора отопления.

Задание

1. Определить температуру внутри и снаружи радиатора.
2. Рассчитать значение коэффициента теплопередачи K .
3. Сделать выводы по работе, составить отчет.

Основные понятия

Схема процесса теплопередачи от нагреваемого теплоносителя (жидкое минеральное масло) к воздуху помещения через разделяющую их стенку показана на рис.9.1.

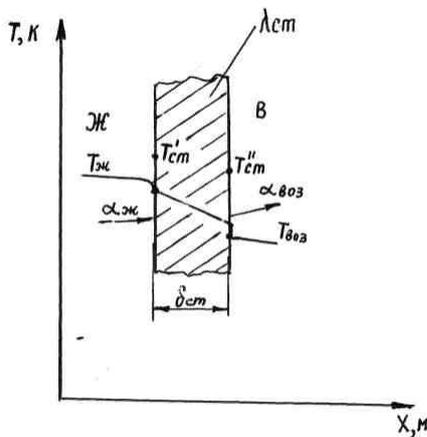


Рис. 9.1. Схема процесса теплопередачи

От жидкости к стенке радиатора тепловой поток передаётся с помощью конвекции, интенсивность которой оценивается коэффициентом теплоотдачи от жидкости к стенке $\alpha_{ж}$. Через стенку тепловой поток передается согласно уравнению Фурье.

От наружной стенке к окружающему воздуху тепловой поток передаётся с помощью конвекции, интенсивность которой оценивается

коэффициентом теплоотдачи от жидкости к стенке $\alpha_{воз}$, При установившемся тепловом потоке:

$$\Phi_{ж} = \Phi_{ст} = \Phi_{воз}, \text{Вт} \quad (1)$$

а так как плотность теплового потока в общем виде определяется по уравнению:

$$q = \frac{\Phi_{т}}{A}; \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}, \quad (2)$$

то:

$$q_{ж} = q_{ст} = q_{воз}; \quad (3)$$

$$\text{или: } \alpha_{ж}(T_{ж} - T'_{ст}) = \frac{\lambda_{ст}}{\delta_{ст}}(T'_{ст} - T''_{ст}) = \alpha_{воз}(T''_{ст} - T_{воз}), \quad (4)$$

где:

$q_{ж}, q_{ст}, q_{воз}$ – плотности теплового потока от теплоносителя к стенке, через стенку и от стенки к воздуху, соответственно, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$;

Φ_T – тепловой поток, передаваемый теплопередачей от жидкого теплоносителя к воздуху, Вт;

A – площадь поверхности радиатора, м²;

$T_{ж}$ – средняя температура теплоносителя (масла) в радиаторе, К;

$T'_{ст}; T''_{ст}$ – средняя температура внутренней и наружной стенок радиатора, К;

$T_{воз}$ – средняя температура воздуха помещения, К;

$\lambda_{ст}$ – средний коэффициент теплопроводности стенки радиатора, равный $194 \frac{Вт}{мК}$;

$\delta_{ст}$ – толщина стенки радиатора, равная 0,001 м.

С учетом соотношения(1) можно записать: $q = K(T_{ж} - T_{воз})$, (5)

где: $K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{ж}} + \frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}} + \frac{1}{\alpha_{воз}}}$, $\frac{Вт}{м^2К}$ - коэффициент теплопередачи. (6)

Подсчитать коэффициент K по формуле (6) не представляется возможным, так как сложно определить $\alpha_{ж}$ и $\alpha_{воз}$ вследствие зависимости их от многочисленных факторов. Поэтому величину K определяют, используя уравнение:

$$K = \frac{q_{ст}}{T_{ж} - T_{воз}}, \quad (7).$$

Температуру $T_{ж}$ можно определить как среднюю с небольшой погрешностью при помощи термопар, устанавливаемых внутри радиатора и омываемых теплоносителем:

$$T_{ж} = \frac{T_1 + T_2 + T_3 + T_4}{4}, \quad (8).$$

Значение $T'_{ст}$ принимается равным $0,98 T_{ж}$. Температура воздуха $T_{воз}$ определяется с помощью термометра, измеряемого температуру в помещении на некотором расстоянии от радиатора.

Площадь поверхности радиатора:

$$A = f_c n, \quad (9)$$

где: f_c – площадь поверхности одной секции, м²;

n – количество секций радиатора.

Тепловой поток Φ , передаваемый теплопередачей, определится как разность между общим тепловым потоком Φ , равного мощности нагревателя (принимается от 100 до 600 ватт по указанию преподавателя) и лучистым тепловым потоком $\Phi_{л}$:

$$\Phi_T = \Phi - \Phi_{л}; \quad (10)$$

$$\Phi_{л} = \varepsilon C_0 \left[\left(\frac{T_{ст}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{воз}}{100} \right)^4 \right] A; \quad (11)$$

где: ε – степень черноты поверхности радиатора, равная 0,4.

$$T_{ст} = \frac{T_5 + T_6 + T_7 + T_8}{4} \quad (12)$$

$C_0 = 5,77$; $\frac{Вт}{м^2 К^4}$ – коэффициент излучения абсолютно черного тела,

T_1, T_2, T_3, T_4 – температуры жидкости вблизи внутренних поверхностей радиатора, $К$;

T_5, T_6, T_7, T_8 – температуры на наружных поверхностях радиатора, $К$.

Экспериментальная установка

Установка (рис. 9.2) представляет собой трехсекционный масляный радиатор 3, внутри и снаружи которого установлены хромель-копелевые термопары 4.

Регистрация температуры осуществляется с помощью мультиметра, подключаемого к разъему, выполненного в корпусе 1. С помощью переключателя 2 производится замер температур: позиции 1-4 – температура теплоносителя, позиции 5-8 – температура наружной стенки радиатора. Переключателем 5 устанавливается заданную мощность нагревателя. Все термопары подключены к переключателю 2 с помощью кабеля 6.

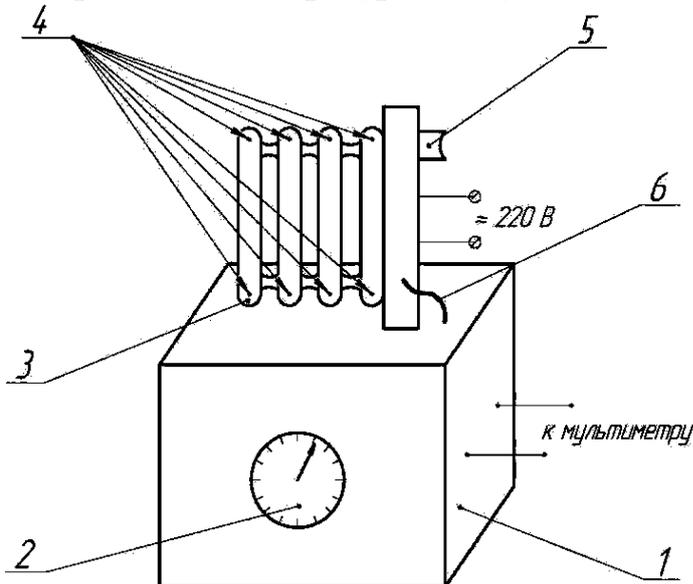


Рис. 9.2. Схема экспериментальной установки

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с установкой и правилами работы на ней.
2. С помощью штепсельной вилки включить нагреватель в электросеть и установить мощность нагревателя, заданную преподавателем.

3. Прогреть установку до достижения стационарного режима, о чем будет свидетельствовать прекращение возрастания температур, показываемых мультиметром.

4. С помощью переключателя 2 и прилагаемого мультиметра 3 замерить температуры в восьми позициях. Повторить замеры температур через 5 и 10 минут с целью определения их средних значений. Результаты замеров занести в протокол наблюдений.

Таблица 9.1

Протокол наблюдений

Но мер опы та	Температура теплоносителя								Температура наружной стенки нагревателя								$t_{\theta 03},$ °C	$T_{\theta 03},$ K
	$t_1,$ °C	$T_1,$ K	$t_2,$ °C	$T_2,$ K	$t_3,$ °C	$T_3,$ K	$t_4,$ °C	$T_4,$ K	$t_5,$ °C	$T_5,$ K	$t_6,$ °C	$T_6,$ K	$t_7,$ °C	$T_7,$ K	$t_8,$ °C	$T_8,$ K		
1																		
2																		
3																		

Обработка экспериментальных данных

1. По результатам замеров подсчитать средние значения температур $T_1 \dots T_4$ и $T_5 \dots T_8$.

2. По ф.8 определить значение $T_{ж}$, а по ф.12 величину $T_{ст}''$; $T_{ст}' = 0,98 T_{ж}$.

3. По ф.11 определить $\Phi_{л}$, по ф.10 значение $\Phi_{Т}$, а затем значение q по ф.2.

4. Зная среднее значение $T_{ж}$ по ф.7 подсчитать K .

5. По значениям $T_{ст}'$ и $T_{ст}''$, принимая значение $\lambda = 194 \frac{Вт}{МК}$, а $\delta = 0,001 м$ по ф. 4 определить $q_{ст}$.

6. По ф.4 определить $\alpha_{ж}$ и $\alpha_{воз}$.

7. По ф.6 подсчитать величину K .

8. Сравнить результаты расчета K , полученные по ф.6 и ф.7.

9. Сделать выводы и оформить отчет по проделанной работе.

Вопросы и задания для самоконтроля

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?

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица 1

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

t , °С	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

Таблица 2

Термодинамические функции воздуха

$t, ^\circ\text{C}$	T, K	$h, \text{кДж/кг}$	$u, \text{кДж/кг}$
0	273,15	273,2	194,8
10	283,15	283,2	202,0
20	293,15	293,3	209,1
30	303,15	303,3	216,3
40	313,15	313,4	223,5
50	323,15	323,4	230,7
60	333,15	333,5	237,9
70	343,15	343,5	245,1

Таблица 3

Психрометрическая таблица

Темпер. “мокрого” терм., $^\circ\text{C}$	Разность показаний сухого и “мокрого” термометров, $^\circ\text{C}$																
	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

Окончание табл. 3

Темпер. “мокро- го” 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
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								

Таблица 4

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

Окончание табл. 4

$T, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$\lambda \cdot 10^2, \text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$	$\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	$a \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	Pr
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

Таблица 5

Степень черноты полного нормального излучения
для различных материалов

Наименование материала	$t, ^\circ\text{C}$	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
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
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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Теплотехника:** учебник для студ. высш. учеб. заведений/ М.Г. Шатров, И.Е. Иванов, С.А. Пришвин и др.; под ред. М.Г. Шатрова. – 2-е изд., испр. – М.: Издательский центр «Академия», 2012. – 288 с. – (Сер. Бакалавриат).
2. **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.
3. **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.
4. **Нацокин В.В.** Техническая термодинамика и теплопередача. – М.: Высш. шк., 1980. – 496 с.
5. **Сергеев А.Г., Крохин В.В.** Метрология. – М.: Логос, 2000. – 408 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

1.Требования к выполнению и оформлению лабораторных работ.....	4
2.Понятия о погрешностях измерений	6
3.Лабораторная работа №1. Исследование изохорного процесса.....	8
4.Лабораторная работа №2. Определение показателя политропы расширения воздуха.....	13
5.Лабораторная работа №3. Определение теплоемкости воздуха.....	17
6.Лабораторная работа №4. Исследование процессов во влажном воздухе.....	23
7.Лабораторная работа №5. Определение теплопроводности материалов.....	33
8. Лабораторная работа №6. Исследование теплоотдачи трубы при свободной конвекции.....	40
9.Лабораторная работа №7. Определение теплоотдачи оребренной поверхности.....	48
10.Лабораторная работа №8. Исследование теплообмена излучением.....	53
11.Лабораторная работа №9. Определение коэффициента теплопередачи радиатора отопления.....	64
12.Приложение.....	70
13.Библиографический список	74

Учебное издание

Басуров Виктор Михайлович
Гуськов Валентин Федорович
Абалаев Андрей Юрьевич
ТЕПЛОТЕХНИКА

Практикум

Электронное издание, исправленное и дополненное.

Владимирского государственного университета.
600000, Владимир, ул. Горького, 87.