

Министерство образования Российской Федерации
Владимирский государственный университет

П.В. АБРАМОВ
В.М. БАСУРОВ
Ю.Г. ГОРНУШКИН
А.С. СУДАРИКОВ

**ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА
И ТЕОРИЯ ТЕПЛООБМЕНА**

Лабораторный практикум

Под редакцией Ю.Г. Горнушкина

Владимир 2003

УДК 621.43 (07)
Т 38

Рецензенты:

Доктор технических наук, профессор
Владимирского государственного университета
А.А. Гаврилов

Кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой “Технико-технологические дисциплины”
Владимирского государственного педагогического университета
Л.Н. Шарыгин

Печатается по решению редакционно-издательского совета
Владимирского государственного университета

Техническая термодинамика и теория теплообмена: Лабораторный
Т38 практикум / П.В. Абрамов, В.М. Басуров, Ю.Г. Горнушкин, А.С. Су-
дариков; Под ред. Ю.Г. Горнушкина; Владим. гос. ун-т. Владимир,
2003. 64 с.
ISBN 5-89368-393-5

Содержит описание девяти лабораторных работ: пяти – по технической тер-
модинамике и четырех – по теории теплообмена.

Предназначен для студентов специальностей 101200 – двигатели внутренне-
го сгорания, 150200 – автомобили и автомобильное хозяйство, 230100 – эксплуа-
тация и обслуживание транспортных и технологических машин и оборудования
в автомобильном транспорте, 250600 – технология переработки пластических
масс и эластомеров, 290700 – теплогазоснабжение и вентиляция.

Соответствует требованиям государственных образовательных стандартов
указанных специальностей.

Лабораторные работы № 6, 7 составил доцент П.В. Абрамов; № 1, 3, 4 – до-
цент В.М. Басуров; № 8, 9 – доцент Ю.Г. Горнушкин; № 2, 5 – доцент А.С. Су-
дариков.

Электронная версия методических указаний представлена на сайте кафедры
“Двигатели внутреннего сгорания” Владимирского государственного универси-
тета по адресу: <http://dvs.vpti.vladimir.ru>.

Ил. 21. Табл. 14. Библиогр.: 9 назв.

УДК 621.43 (07)

ISBN 5-89368-393-5

© Владимирский государственный
университет, 2003

ТРЕБОВАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ И ОФОРМЛЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

В каждой лабораторной работе даются ее назначение, задание, описание опытной установки, порядок выполнения работы и обработки опытных данных, требования к отчету, вопросы для самоконтроля.

Каждая работа относится 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 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 с разрешения преподавателя. При выполнении работы студент заносит результаты измерений в протокол наблюдений, который подписывается преподавателем и должен находиться в отчете.

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 получения зачета по выполненной работе следует представить преподавателю отчет, показать знание основных положений теории, техники и методики опыта, а также умение критически оценивать полученные результаты. При наличии хотя бы одной незащищенной работы студент к выполнению последующей не допускается.

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 абсолютно свободный от искажений результат. 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 в изохорном процессе.

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. Составить отчет.

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, внешняя теплота расходуется целиком на изменение внутренней энергии газа

$$dq = du = c_v dT,$$

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

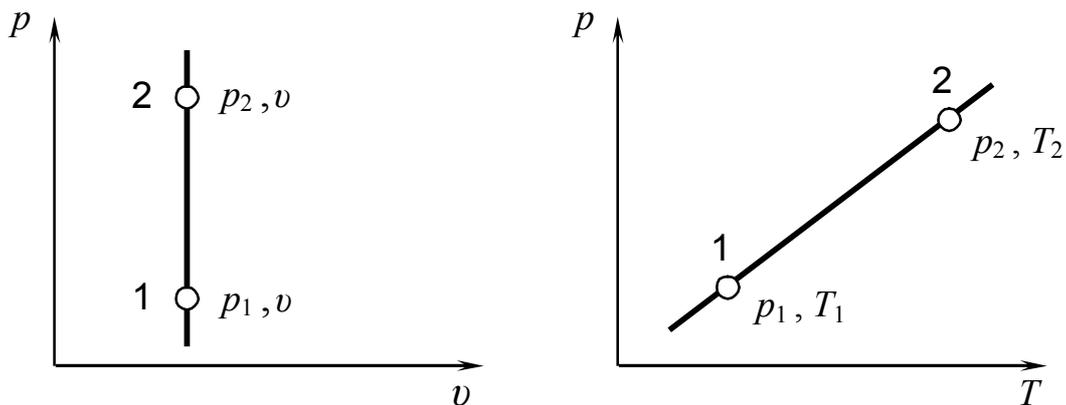


Рис. 1.1. Графики изохорного процесса

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

При постоянной теплоемкости c_v (независящей от температуры)

$$\Delta u = u_2 - u_1 = c_v (T_2 - T_1). \quad (1.2)$$

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

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

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.

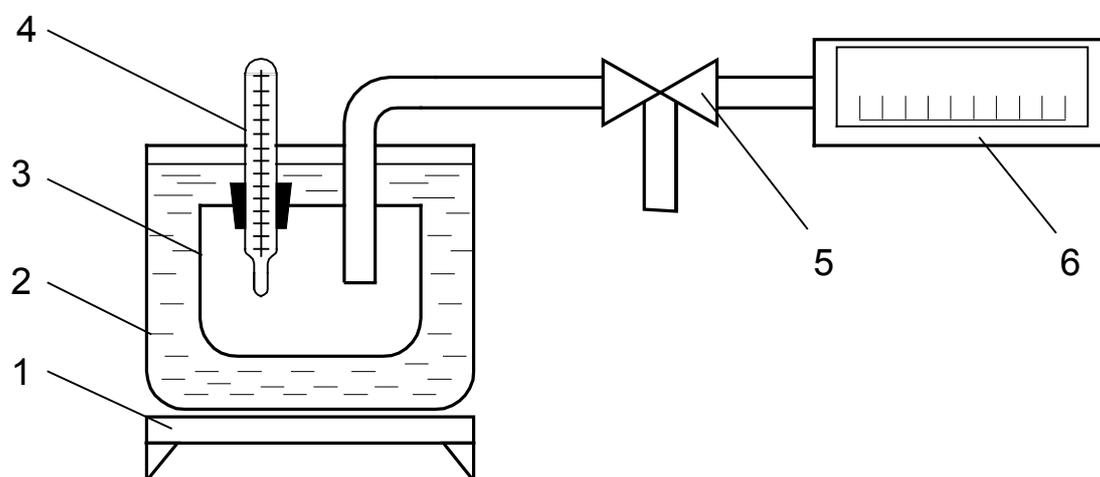


Рис. 1.2. Схема экспериментальной установки

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, для чего открыть кран 5. При этом стрелка манометра 6 установится на нуль. Закрывать кран.

4. Включить нагреватель в сеть.

5. Через каждые 4°C регистрировать температуру и давление воздуха в сосуде 3 (по манометру).

6. При температуре 60°C опыт прекратить и отключить установку от электрической сети.

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

Таблица 1.1

Протокол наблюдений

Номер опыта	Температура T		Избыточное давление $p_{изб}$		Атмосферное давление $p_{атм}$	Абсолютное давление $p_{абс}$
	°C	К	мм рт. ст.	кПа	кПа	кПа

Обработка опытных данных

1. Перевести результаты измерений (при необходимости) в единицы СИ. Полученные значения величин записать в соответствующие колонки табл. 1.2.

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

$$p_{абс} = p_{изб} + p_{атм} \quad \text{и} \quad T, \text{ К} = T, \text{ °C} + 273,15.$$

На этом же графике построить теоретическую зависимость $p_{\text{абс}} = f(T)$, 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.

3. Определить изменение 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 0,72 кДж/(кг·К). Значения средних теплоемкостей 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 рассчитанным давлениями в каждой опытной точке. Результаты (в абсолютных величинах и в процентах) занести в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Результаты обработки опытных данных

Параметры и погрешности	Номера опытных точек							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Температура, К								
Абсолютное давление экспериментальное, кПа								
Абсолютное давление расчетное, кПа								
Разность между экспериментальным и расчетным давлениями, кПа								
Относительная разность экспериментального и расчетного давлений, %								

Вопросы и задания для самоконтроля

1. Дать определение основных термодинамических процессов.
2. Как графически изображаются на pV -диаграмме изохора, изобара, изотерма, адиабата?

3. Написать формулы соотношений между параметрами p , v и T для каждого из процессов идеального газа.

4. Объяснить, почему повышается температура при расширении газа в изобарном процессе.

5. Почему в адиабатном процессе расширения тела температура убывает, а при сжатии повышается?

6. Объяснить характер взаимного расположения на $p v$ -диаграмме изотермы и адиабаты, проведенных из одной точки, при расширении и сжатии газа.

7. По каким уравнениям вычисляется изменение энтропии в основных термодинамических процессах?

8. Почему на построенных графиках изохорного процесса расчетная изохора не вполне совпадает с экспериментальной?

Лабораторная работа № 2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ПОЛИТРОПЫ РАСШИРЕНИЯ ВОЗДУХА

Назначение работы. Определение показателя политропы расширения воздуха в экспериментальной установке.

Задание:

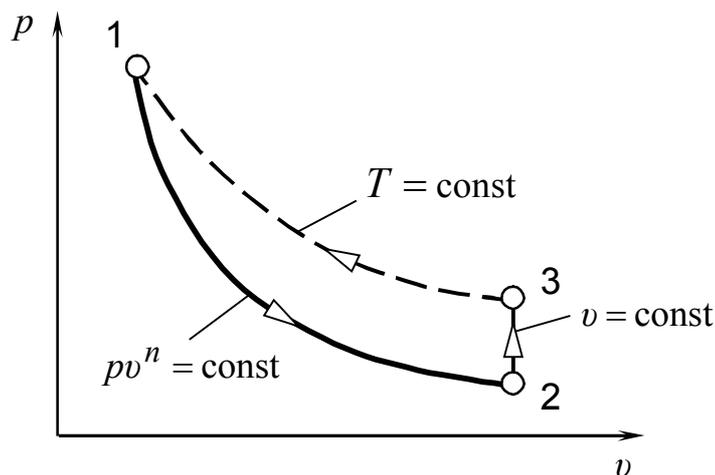


Рис. 2.1. Схема к определению показателя политропы расширения воздуха

1. Осуществить на экспериментальной установке политропный процесс расширения воздуха.

2. Определить значение показателя политропы расширения воздуха.

3. Построить диаграмму процессов, происходящих в установке.

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.

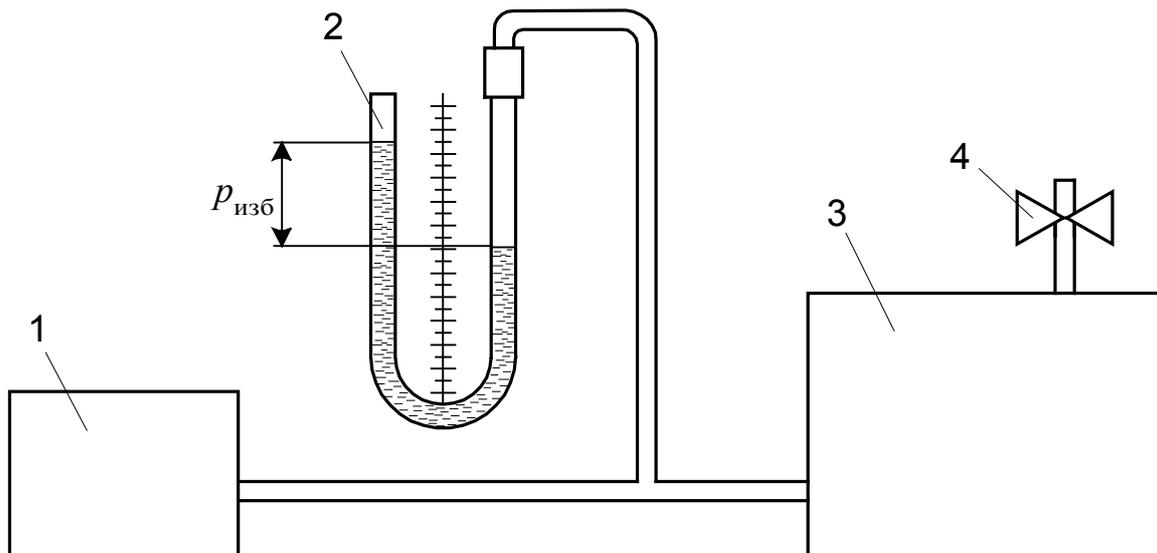


Рис. 2.2. Схема экспериментальной установки

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 приходилось измерять только давление. Возможность такого преобразования легко установить, рассмотрев рис. 2.1, на котором кроме политропного процесса расширения 1-2 изображен изохорный процесс нагревания воздуха 2-3 до температуры $T_3 = T_1$.

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 переписать 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 в конце последующего изохорного нагрева (p_3), заканчиваемого при достижении первоначальной температуры 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 нагнетания воздуха.

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

Порядок выполнения работы

1. Записать параметры состояния атмосферного воздуха – температуру $T_{\text{атм}}$ и давление $p_{\text{атм}}$ – в протокол наблюдений.

Протокол наблюдений

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

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

установившемся показанию жидкостного манометра. Величину избыточного давления $p_{1\text{изб}}$ в миллиметрах водяного столба записать в протокол наблюдений.

4. Открыть кран и следить за показаниями манометра. При достижении равенства уровней воды в трубках манометра, 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 температура воздуха в баке уменьшится до $T_2 < T_1$. Поэтому *после закрытия крана* воздух будет 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 измерить и записать в протокол наблюдений избыточное давление $p_{3\text{изб}}$ в конце изохорного процесса.

Обработка опытных 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. По результатам измерений и вычислений построить график трех термодинамических процессов (см. рис. 2.1). При выборе масштабов учитывать реальные диапазоны изменения параметров состояния воздуха.

Вопросы и задания для самоконтроля

1. В каких пределах может изменяться показатель политропы в различных процессах?

2. Как определить работу расширения газа и количество подводимой теплоты в политропном процессе?

3. В каких политропных процессах теплота к газу подводится, а в каких отводится?

4. Как с помощью лабораторной установки определить показатель адиабаты?

5. Как на лабораторной установке осуществить изотермическое расширение воздуха?

6. Указать на диаграмме (см. рис. 2.1) точку, соответствующую состоянию воздуха в лаборатории во время проведения опыта.

7. Определить массу воздуха в баке до открытия крана и после его закрытия.

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.

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

$$c = \mu c / \mu; \quad c' = \mu c / 22,4 = c \rho_H. \quad (3.1)$$

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 ($p_H = 101332$ Па, $T_H = 273,15$ К); R – его газовая постоянная, Дж/(кг·К); μ – молекулярная масса, кг/кмоль; $22,4$ 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 $dl = 0$. Под внутренней энергией понимают 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 внутренней энергии, так и на совершение работы (т. е. на изменение энтальпии), 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 $i = u + pv$, 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:

$$u = \int_{0^\circ\text{C}}^T c_v dT = c_v \Big|_{0^\circ\text{C}}^T T ; \quad (3.2)$$

$$i = \int_{0^\circ\text{C}}^T c_p dT = c_p \Big|_{0^\circ\text{C}}^T T . \quad (3.3)$$

Внутренняя энергия и энтальпия идеальных газов принимаются равными нулю при $T = 0^\circ\text{C}$. 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

$$c'_p - c'_v = \mu R / 22,4 = 0,371 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}),$$

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 отношения (3.4) и зная 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:

$$c = dq / dT.$$

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 либо 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

$$c_m \Big|_{T_1}^{T_2} = \int_{T_1}^{T_2} c dT / (T_2 - T_1) = \left(c_m \Big|_{0^\circ\text{C}}^{T_2} - c_m \Big|_{0^\circ\text{C}}^{T_1} \right) / (T_2 - T_1) \quad (3.6)$$

где $c_m \Big|_{0^\circ\text{C}}^T$ – средняя теплоемкость в интервале температур от 0 до $T^\circ\text{C}$; T_1 и T_2 – граничные температуры интервала, для которого определяется c_m , $^\circ\text{C}$.

Теплоемкость идеальных газов зависит от температуры. Величина теплоемкости реальных газов зависит также и от давления, влияние которого при высоких температурах ($T > 1000$ $^\circ\text{C}$) 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.

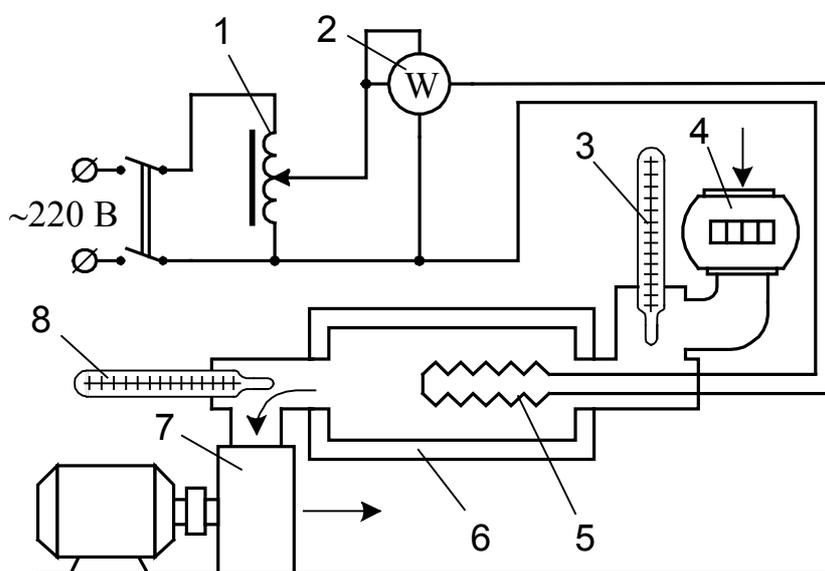


Схема экспериментальной установки

Воздух объемным насосом 7 просасывается через калориметр 6, представляющий собой стеклянную трубку, покрытую слоем тепловой изоляции. Внутри калориметра находится электрический нагреватель 5. Мощность, потребляемая нагревателем, 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. Дождаться установления постоянной температуры воздуха на выходе из калориметра, после чего зафиксировать и 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 два опыта в соответствии с п. 5.

7. Рукоятку регулятора напряжения установить в нулевое положение, отключить регулятор от сети, выключить насос.

8. Результаты измерений заносить в протокол наблюдений (табл. 3.1).

Таблица 3.1

Протокол наблюдений

Номер опыта	Мощность нагревателя W , Вт	Температура воздуха в калориметре, °С		Показания расходомера воздуха, м ³		Объем воздуха, прошедшего через калориметр, V , м ³		Атмосферное давление $P_{\text{атм}}$, кПа
		на входе T_1	на выходе T_2	в начале опыта	в конце опыта	за 5 мин	за 1 с	

Обработка опытных данных

Обработка ведется по данным последнего опыта.

1. Вычислить среднюю объемную изобарную теплоемкость по уравнению:

$$c'_{pm} = Q / [\varphi V_{\text{н}} (T_2 - T_1)] ,$$

где Q – количество теплоты, подведенное к воздуху в калориметре за время одного опыта, кДж/с (кВт),

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

W – мощность, рассеиваемая на электронагревателе, Вт; φ – коэффициент расхода объемного расходомера, величина которого принимается по указанию преподавателя; T_1 и T_2 – температура воздуха на входе в калориметр и на выходе из него, °С; 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.

3. Из соотношений (3.5) определить показатель адиабаты k .

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

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

6. 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 опытных данных

Способ определения	Теплоемкости						Внутренняя энергия u , кДж/кг	Энтальпия i , 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. Определение удельной теплоемкости.
2. Понятие средней и истинной теплоемкости.
3. Уравнение Майера и смысл величин, входящих в него.

4. Физический смысл газовой постоянной.
5. Какая из двух теплоемкостей – c_p или 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?
10. Понятие внутренней энергии газа. Отличие внутренней энергии идеального газа от внутренней энергии реального.
11. 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 *id*-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 *id*-диаграмме влажного воздуха.
4. Определить по *id*-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.

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 $p_{\text{в}}$ и водяного пара $p_{\text{п}}$

$$p = p_{\text{в}} + p_{\text{п}} .$$

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 $\rho_{\text{п}}$ пара в смеси при собственном парциальном давлении и температуре смеси, кг/м^3 ,

$$\rho_{\text{п}} = m_{\text{п}}/V_{\text{см}} ,$$

где $m_{\text{п}}$ – масса пара, кг; $V_{\text{см}}$ – 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, %,

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

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

$$\varphi = (p_{\text{п}}/p_{\text{н}}) \cdot 100 ,$$

где $p_{\text{н}}$ – давление насыщенного пара.

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

Влагосодержанием влажного воздуха называют отношение массы m_{Π} водяного пара, содержащегося в некотором объеме влажного воздуха, к массе m_B сухого воздуха, находящегося в том же объеме, г/кг

$$d = m_{\Pi}/m_B = \rho_{\Pi}/\rho_B .$$

Парциальное давление водяного пара во влажном воздухе можно определить по формуле

$$p_{\Pi} = p d / (622 + d) ,$$

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

Если $p_{\Pi} = p_H$ при данной температуре, то влагосодержание при состоянии насыщения на 1 кг сухого воздуха определяется из выражения

$$d_H = 622 p_H / (p - p_H) .$$

Последнее уравнение показывает, что при $p_H \rightarrow p$ $d \rightarrow \infty$; $d = \infty$ 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 i , а также проводить исследования термодинамических процессов с влажным воздухом с помощью id -диаграммы (рис. 4.1), справедливой для давления $p = 99300$ Па (745 мм рт. ст.), соответствующего среднему годовому значению барометрического давления в центральных районах России.

В id -диаграмме по оси абсцисс откладывается влагосодержание d (г/кг сухого воздуха), а по оси ординат – удельная энтальпия i 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 $i = 0$.

При построении id -диаграммы для удобства расчета использована координатная система координат, так как при этом область ненасыщенного воздуха занимает большую площадь диаграммы. Через точки на оси ординат проводят линии $i = \text{const}$ 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 id -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 $p_{\text{II}} = f(d)$ (точка E). Ордината этой точки по крайней правой шкале определяет значение p_{II} (14 кПа).

Кроме определения параметров влажного воздуха id -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 id -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 id -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) представляет собой камеру для нагревания и увлажнения воздуха, в которой насыщение последнего влагой происходит при испарении воды из хлопчатобумажной ткани. Воздух из помещения лаборатории, температура которого оценивается по показаниям T_{cA} сухого

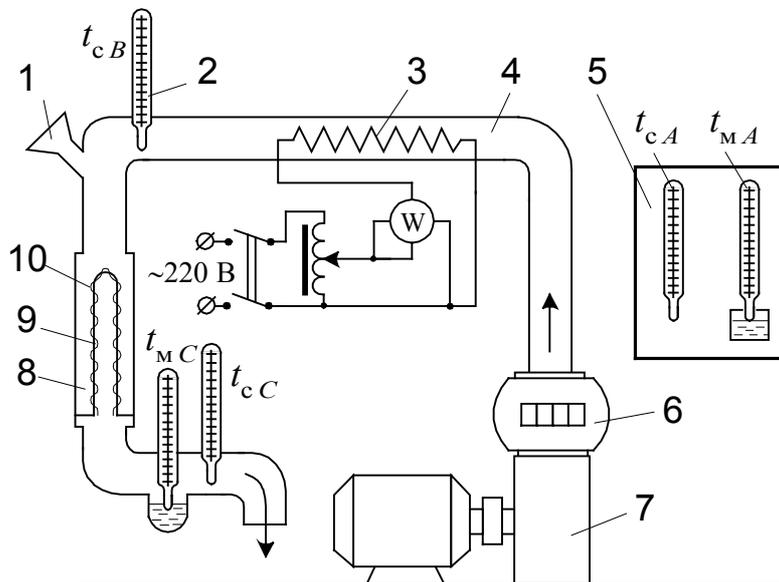


Рис. 4.2. Схема экспериментальной установки

и T_{mA} “мокрого” термометров, образующих психрометр 5, подается вентилятором 7 через объемный расходомер 6 в калорифер 4, где подогревается до температуры T_{cB} , измеряемой термометром 2. Тепловая нагрузка элек-

Обработка экспериментальных данных

По средним значениям измеренных величин одного опыта нанести на *id*-диаграмму точку, характеризующую исходное состояние влажного воздуха на входе в калорифер (по значениям $T_{сА}$ и $T_{мА}$ – точка *A*); процесс нагрева (вертикальная прямая *AB*, по значению $T_{сВ}$ – точка *B*); процесс насыщения воздуха влагой (прямая *BC*, по значениям $T_{сС}$ и $T_{мС}$ – точка *C*).

По *id*-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 опытных данных

Состояние воздуха	i , кДж/кг	d , г/кг	T_p , °С	$p_{п}$, кПа	ϕ , %
На входе в калорифер, точка <i>A</i>					
На выходе из калорифера, точка <i>B</i>					
На выходе из увлажнительной камеры, точка <i>C</i>					

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,

$$p_{в} = p_{атм} - p_{п} ,$$

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

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

$$m_{в} = \frac{p_{в} V}{R_{в} T} ,$$

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,

$$Q_K = m_B (i_B - i_A);$$

– неучтенные потери теплоты в калорифере, кДж,

$$Q_{\text{пот}} = Q - Q_K;$$

– неучтенные потери теплоты в увлажнительной камере, кДж,

$$Q_C = m_B (i_B - i_C);$$

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

$$Q_{\text{уст}} = m_B (i_C - i_A);$$

– 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 (i , T_p , d , $p_{\text{п}}$, φ) по id -диаграмме?
7. Описать id -диаграмму влажного воздуха. Какие линии изображены на диаграмме?
8. Как протекает процесс сушки в реальной и идеальной сушильной камере?

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТОПИТЕЛЬНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛООВОГО НАСОСА

Назначение работы. Получение навыков испытаний теплотехнических установок.

Задание:

Провести испытание теплового насоса и по результатам определить его отопительный коэффициент.

Основные понятия

Тепловым насосом называется машина, работающая по холодильному термодинамическому циклу и предназначенная для передачи теплоты окружающей среды, например атмосферного воздуха, грунтовых вод на более высокий температурный уровень. Такая “противоестественная” передача теплоты от менее нагретой среды к более нагретой требует затраты энергии от приводного двигателя.

С точки зрения затрат первичной энергии, т. е. теплоты сгорания топлива, наиболее эффективными приводными двигателями являются тепловые двигатели. Например, при использовании двигателя внутреннего сгорания с КПД $\eta = 0,4$ при частичном использовании теплоты охлаждающей воды и отработавших газов тепловой насос даёт теплоты больше, чем прямое (огневое) сжигание топлива. Однако до настоящего времени в качестве приводных двигателей обычно используются менее экономичные чем ДВС, но более удобные в эксплуатации электродвигатели.

Работа теплового насоса, принципиальная схема которого представлена на рис. 5.1, состоит в следующем. В испарителе 1 за счёт теплоты на-

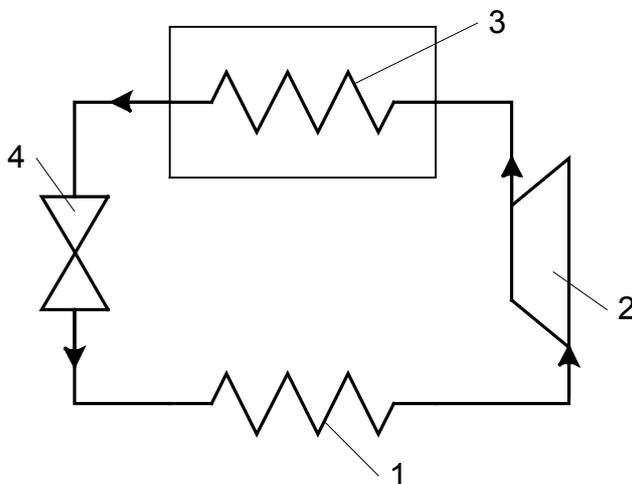


Рис. 5.1. Схема теплового насоса

ружной среды происходит парообразование рабочего тела (хладона). Образовавшийся пар сжимается в компрессоре 2 с повышением температуры (зависящей от степени сжатия в компрессоре). Затем пар поступает в конденсатор 3, в котором он конденсируется, отдавая теплоту нагреваемой среде. После этого конденсат рабочего тела направляется в дроссельное устройство 4 (на-

пример, вентиль или капиллярную трубку), в котором происходит понижение давления. С пониженным давлением конденсат рабочего тела снова направляется в испаритель 1.

Теоретический цикл теплового насоса в координатах $T-s$ (температура – энтропия) показан на рис. 5.2, где:

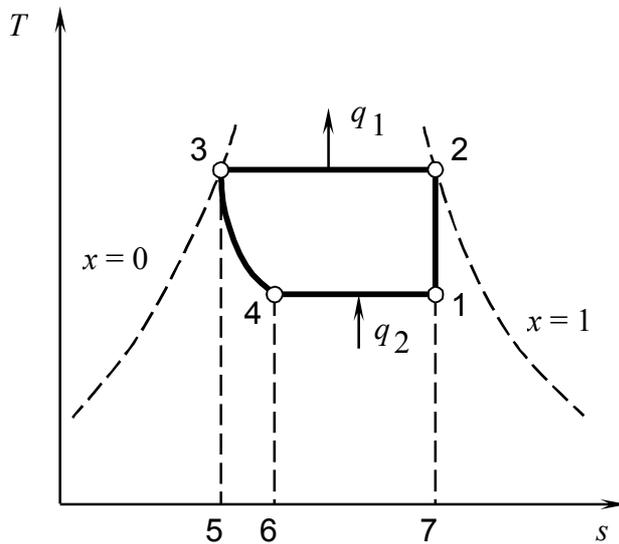


Рис. 5.2. Цикл теплового насоса

1-2 – адиабатное сжатие рабочего тела в компрессоре,

2-3 – конденсация паров с отдачей теплоты q_1 нагреваемой среде в конденсаторе,

3-4 – дросселирование в дроссельном устройстве.

4-1 – парообразование с подводом теплоты q_2 от наружной среды в испарителе.

Теплота q_2 , получаемая 1 кг рабочего тела в испарителе, эквивалентна площади 14671, а теплота q_1 , отводимая в конденсаторе, –

площади 23572. Значения q_1 и q_2 определяются через энтальпию i рабочего тела в соответствующих точках цикла по формулам

$$q_2 = i_1 - i_4, \quad q_1 = i_2 - i_3.$$

Работа l_0 , затраченная на совершение цикла, равна работе в процессе адиабатного сжатия, т. е.

$$l_0 = q_1 - q_2 = i_2 - i_1$$

(в процессе дросселирования 3-4 $i = \text{const}$, т. е. $i_4 = i_3$).

Комплексной характеристикой совершенства цикла теплового насоса служит отношение количества теплоты, отданной нагреваемой среде, к затраченной на это работе, т. е.

$$\Psi_T = q_1/l_0.$$

Коэффициент Ψ_T называется теоретическим отопительным коэффициентом, или коэффициентом преобразования энергии.

Идеальным циклом теплового насоса является обратный цикл Карно, для которого

$$\Psi_T = T_1/(T_1 - T_2),$$

где T_1 и T_2 – температуры в процессах конденсации и испарения. Эта формула позволяет оценить предельно высокое значение отопительного коэффициента теплового насоса.

Фактическое значение отопительного коэффициента теплового насоса определяется по формуле

$$\Psi_{\text{ф}} = Q_1/N,$$

где Q_1 – тепловой поток к нагреваемой среде, Вт;

N – работа за единицу времени (мощность), фактически расходуемая на привод компрессора.

Значение $\Psi_{\text{ф}}$ меньше, чем $\Psi_{\text{т}}$, т. к. фактически затрачиваемая на привод компрессора работа больше работы, необходимой при идеальном адиабатном сжатии.

На величине $\Psi_{\text{ф}}$ отрицательно сказывается также то, что в действительном тепловом насосе процесс сжатия рабочего тела в компрессоре может частично или полностью осуществляться в области перегретого пара. На рис. 5.3 показан общий вид рабочего цикла теплового насоса, в котором процесс сжатия 1-2 совершается полностью в области перегретого пара (выше линии $x = 1$). В этом цикле процессы подвода и отвода теплоты 5-6-1 и 2-3-4 не являются изотермическими, поэтому отопительный коэффициент получается меньше, чем в идеальном цикле Карно, осуществляемом в области насыщенного пара.

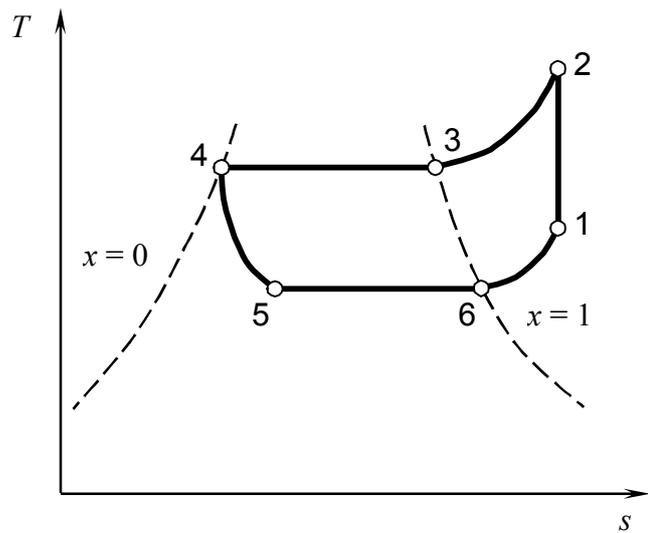


Рис. 5.3. Цикл теплового насоса, работающего на перегретом паре

Экспериментальная установка

Испытываемый тепловой насос выполнен на базе модернизированного парокompрессорного холодильного агрегата и содержит (см. рис. 5.4) последовательно соединенные компрессор 8 с электродвигателем мощностью 130 Вт, конденсатор 6, дроссель (капиллярную трубку) 4, испаритель 2 в камере 1. Термопара 7, подключенная к милливольтметру 5, служит для измерения температуры стенки конденсатора $t_{\text{к}}$.

В лабораторной установке наружной средой (низкотемпературным источником теплоты) служит воздух в камере 1, а нагреваемой средой – воздух в лаборатории. Изображенная на рис. 5.4 стенка 3 условно имитирует стену отапливаемого помещения.

Порядок выполнения работы

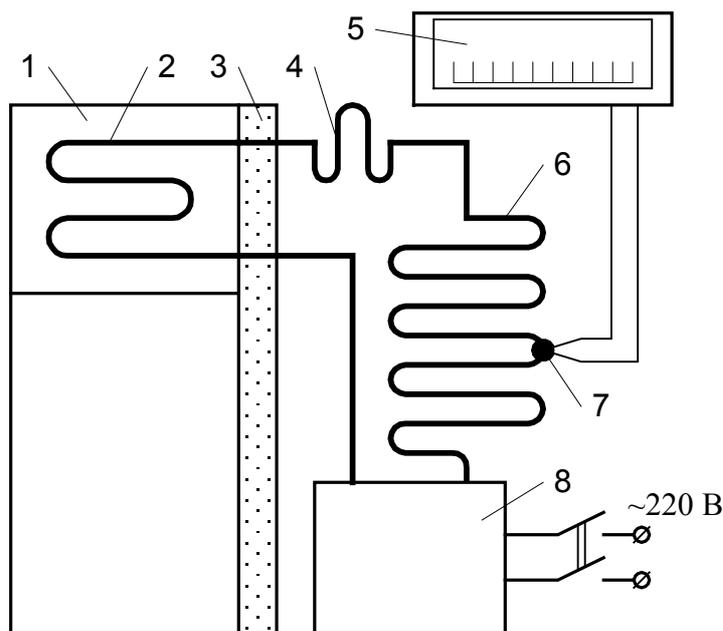


Рис. 5.4. Схема экспериментальной установки

1. Ознакомиться с принципом работы теплового насоса и с методикой его испытания.

2. Записать в протокол наблюдений температуру окружающего воздуха t_0 .

3. Включить в электросеть двигатель компрессора.

4. С интервалом времени 3-4 мин записать в протокол наблюдений результаты замеров температуры конденсатора t_K .

5. Испытание проводить 20-25 мин, после чего отключить тепловой насос от электросети.

Протокол наблюдений

$t_0, ^\circ\text{C}$	$N, \text{Вт}$	$F, \text{м}^2$	$\alpha, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$	$t_K, ^\circ\text{C}$

Обработка опытных данных

По результатам последнего замера t_K , когда тепловой режим установки близок к стационарному, вычисляют фактический отопительный коэффициент

$$\Psi_{\text{ф}} = Q_1 / N = \alpha F (t_K - t_0) / N$$

где α – коэффициент теплоотдачи. В условиях естественной конвекции (без обдува) принять $\alpha = 10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; F – площадь теплоотдающей поверхности в м^2 (измеряется или задается преподавателем).

Вопросы и задания для самоконтроля

1. Дать описание теплового насоса.
2. Изобразить идеальный, теоретический и рабочий циклы теплового насоса на диаграмме $T-s$.
3. Что такое отопительный коэффициент? Его определение и примерные числовые значения.
4. Какое преимущество имеют тепловые насосы по сравнению с электронагревательными установками.
5. Особенности и преимущества теплового насоса при использовании ДВС в качестве приводного двигателя.
6. Предложить вариант и схему практического использования теплового насоса.

Лабораторная работа № 6

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Назначение работы. Ознакомление с основами теории теплопроводности, методикой экспериментального исследования стационарной теплопроводности и приобретение навыков в проведении теплотехнического эксперимента.

Задание:

Определить опытным путем значение коэффициента теплопроводности теплоизоляционного материала и установить его зависимость от средней температуры теплоизоляционного слоя.

Основные понятия

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 мгновенных значений температуры во всех точках тела 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. 6.1), К/м:

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

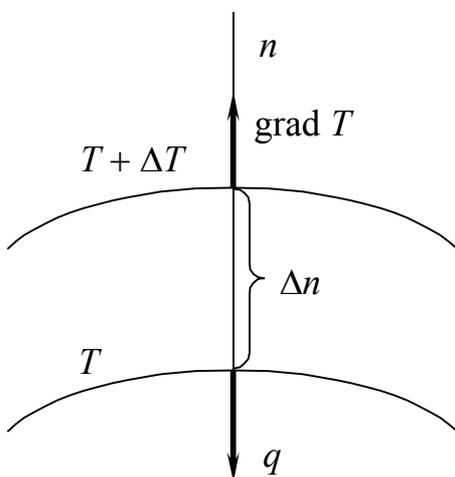


Рис. 6.1. Схема к определению градиента температуры

Температурный градиент – 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:

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

Плотность теплового потока – это количество теплоты, проходящее через единицу площади поверхности в единицу времени; коэффициент пропорциональности λ называется коэффициентом теплопроводности материала. В интегральной форме закон Фурье имеет вид, Вт,

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

Из этого уравнения коэффициент теплопроводности определится соотношением, Вт/(м·К),

$$\lambda = Q / \left(- \frac{\partial T}{\partial n} F \right).$$

Он 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 и влажности и определяется экспериментально. Коэффициент теплопроводности различных веществ изменяется в широких пределах:

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

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

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

– для строительных и теплоизоляционных материалов $0,023 \leq \lambda \leq 2,9$ Вт/(м·К). Материалы, у которых $\lambda < 0,25$ Вт/(м·К), называются теплоизоляционными. С повышением температуры коэффициент теплопроводности этих материалов обычно возрастает.

В настоящей работе экспериментально определяется коэффициент теплопроводности теплоизоляционных материалов методом “трубы” при стационарном тепловом режиме.

Если имеется цилиндрическая труба длиной L с внутренним диаметром $d_{\text{в}}$ и наружным $d_{\text{н}}$, изготовленная из исследуемого материала, а температура ее внутренней поверхности $T_{\text{в}}$ и наружной $T_{\text{н}}$, то в соответствии с законом Фурье

$$Q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} F = -2 \pi r L \lambda \frac{dT}{dr},$$

где r – текущее значение радиуса, м.

Разделив переменные, получим:

$$dT = - \frac{Q}{2 \pi L \lambda} \frac{dr}{r}.$$

Принимая граничные условия при $r = r_B: T = T_B$ и при $r = r_H: T = T_H$ и интегрируя это уравнение, получим

$$T_H - T_B = -\frac{Q}{2\pi L\lambda} \ln \frac{r_H}{r_B},$$

откуда
$$\lambda = Q \ln \frac{d_H}{d_B} / [2\pi L(T_B - T_H)]. \quad (6.1)$$

Экспериментальная установка

Установка для определения коэффициента теплопроводности теплоизоляционных материалов методом “трубы” (рис. 6.2) состоит из тонко-

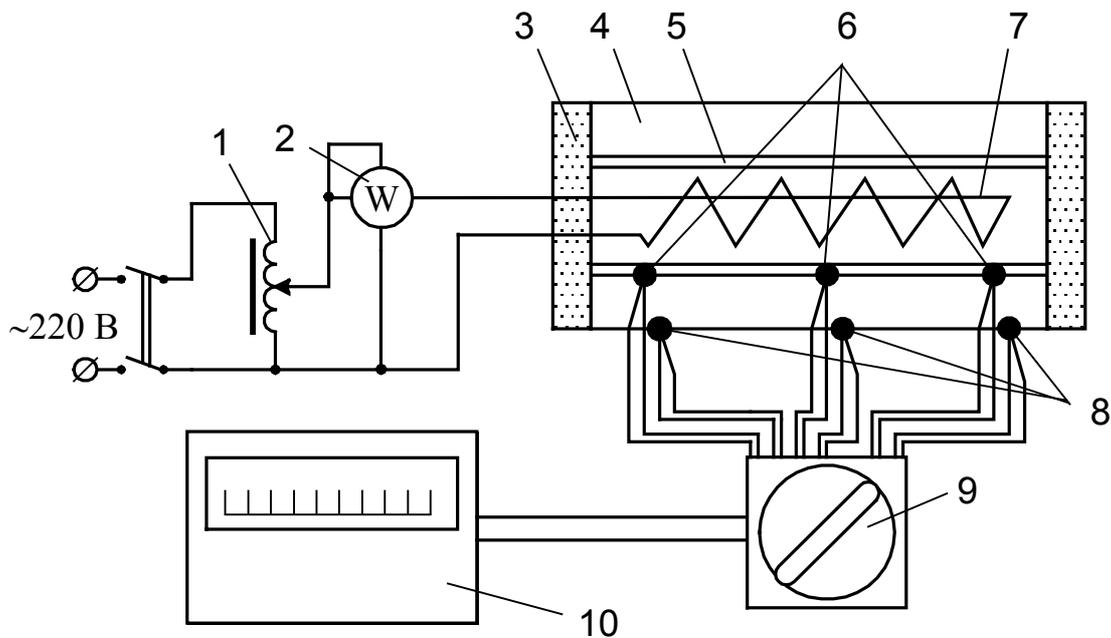


Рис. 6.2. Схема экспериментальной установки

стенной металлической трубы 5, играющей роль основы (каркаса), на поверхность которой нанесен исследуемый материал 4 (в данной установке – асбестовый картон). Внутри трубы расположен электронагреватель 7. Потребляемая нагревателем мощность регулируется регулятором напряжения 1 и измеряется ваттметром 2. Для уменьшения утечек тепла через торцы труб последние покрыты тепловой изоляцией 3. Температуры внутренней и наружной поверхностей слоя измеряются термопарами ТХК 6 и 8, поочередно подсоединяемыми переключателем 9 к потенциометру (или милливольтметру) 10.

Порядок выполнения работы

1. Перед выполнением работы изучить устройство установки.
2. Под наблюдением преподавателя или лаборанта включить установку и установить первый режим нагрева *по указанию преподавателя*. На этом режиме установка должна находиться до наступления установившегося теплового состояния, критерием которого является прекращение возрастания температуры наружного слоя исследуемого материала. Сделать три замера температуры по всем термопарам с интервалом между замерами 5 мин.
3. Для получения зависимости $\lambda = f(T_{\text{ср}})$ повторить эксперимент еще 2-3 раза при других мощностях нагревателя. Результаты измерений занести в протокол наблюдений.

Протокол наблюдений

Номер опыта	$W_{\text{п}}, \text{Вт}$	Температура, °С						Средняя температура слоя исследуемого материала $T_{\text{ср}}, \text{°С}$	Коэффициент теплопроводности материала $\lambda, \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$
		внутренней поверхности			наружной поверхности				
		$T_{\text{в1}}$	$T_{\text{в2}}$	$T_{\text{в3}}$	$T_{\text{н1}}$	$T_{\text{н2}}$	$T_{\text{н3}}$		

Обработка опытных данных

1. Определить средние значения температур на внутренней и наружной поверхностях по последнему замеру на исследуемом режиме

$$T_{\text{в}} = (T_{\text{в1}} + T_{\text{в2}} + T_{\text{в3}})/3 \quad \text{и} \quad T_{\text{н}} = (T_{\text{н1}} + T_{\text{н2}} + T_{\text{н3}})/3.$$

2. Определить среднее значение температуры исследуемого материала

$$T_{\text{ср}} = (T_{\text{в}} + T_{\text{н}}) / 2 \quad (6.2)$$

3. Вычислить коэффициент теплопроводности по формуле (6.1), где Q – тепловой поток, численно равный мощности нагревателя. Результаты расчета записать в таблицу.

4. Построить по полученным значениям график $\lambda = f(T_{\text{ср}})$.

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. Теплопроводность через многослойные плоскую и цилиндрическую стенки.

Лабораторная работа № 7

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОТДАЧИ ТРУБЫ ПРИ СВОБОДНОЙ КОНВЕКЦИИ

Назначение 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 горизонтальной трубы 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.

Основные понятия

Теплоотдачей называется обмен тепловой энергией между поверхностью твердого тела и омывающими ее капельной жидкостью или газом (далее 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.

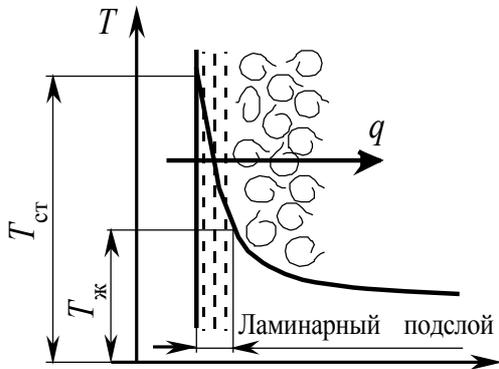


Рис. 7.1. Ламинарный пристеночный слой

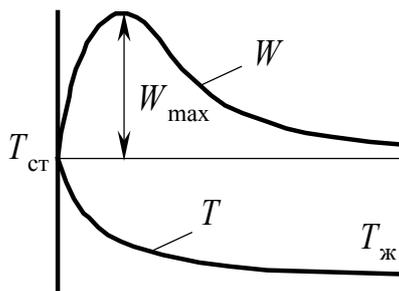


Рис. 7.2. Изменение температуры и скорости жидкости в пограничном слое

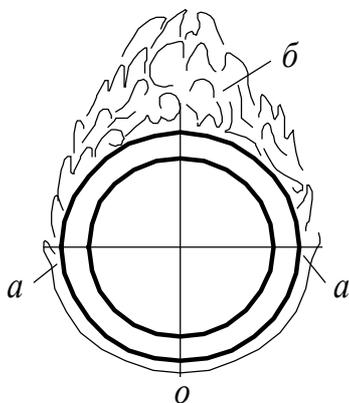


Рис. 7.3. Характер движения воздуха около нагретой трубы

Для газов и жидкостей интенсивность теплоотдачи в основном определяется термическим сопротивлением ламинарного пристенного подслоя. Это обстоятельство иллюстрируется рис. 7.1, на котором 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. 7.2).

В развитии свободного движения жидкости форма тела играет второстепенную роль. Здесь большое значение имеют протяженность поверхности, вдоль которой происходит движение, и ее положение. Характер движения воздуха около нагретой горизонтальной трубы показан на рис. 7.3. 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

$$Q = \alpha F (T_{ст} - T_{ж}),$$

где Q – 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 α_k и излучением α_l , т. е. $\alpha = \alpha_k + \alpha_l$; $T_{ст}$ – температура стенки (поверхности твердого тела), $^{\circ}C$; $T_{ж}$ – температура жидкости вдали от стенки, $^{\circ}C$. Разность температур стенки и жидкости $\Delta T = T_{ст} - T_{ж}$ называется температурным напором.

Теплоотдача является весьма 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 целого 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, сплошности для несжимаемой жидкости, 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 подобия. 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.

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

– Нуссельта
$$\text{Nu} = \alpha_{\text{к}} l / \lambda_{\text{ж}}, \quad (7.1)$$

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

Критерий Нуссельта является определяемым, так как в него входит *искомая* величина $\alpha_{\text{к}}$. Он характеризует теплообмен на границе “стенка – жидкость”;

– Рейнольдса
$$\text{Re} = W l / \nu,$$

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;

– Грасгофа
$$\text{Gr} = g l^3 \beta \Delta T / \nu^2,$$

где g – ускорение свободного падения, м/с²; β – коэффициент теплового объемного расширения жидкости, 1/К; ΔT – температурный напор, К. Критерий Грасгофа характеризует подъемную силу, возникающую в жидкости вследствие разности плотностей нагретых и холодных ее частиц;

– Прандтля
$$\text{Pr} = \nu / a,$$

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

При изучении конвективного теплообмена в случае вынужденного движения жидкости уравнения подобия в общем виде имеет вид

$$\text{Nu} = c \text{Re}_{\text{ж}}^n \text{Pr}_{\text{ж}}^m (\text{Pr}_{\text{ж}} / \text{Pr}_{\text{ст}})^{0,25}.$$

При свободной конвекции расчет может проводиться по уравнению

$$\text{Nu}_{d,h} = c \text{Gr}_{d,h}^{0,25}, \quad (7.2)$$

В котором c – постоянный коэффициент, величина которого зависит от пространственного положения трубы. Для горизонтальной трубы $c = 0,460$, для вертикальной $c = 0,695$. Уравнение (7.2) может использоваться при $10^3 < (\text{Gr}_{d,h} \cdot \text{Pr}) < 10^9$.

Индексы d и h показывают, что должно являться определяющим размером при вычислении критериев Нуссельта и Грасгофа (диаметр или высота трубы, в зависимости от ее положения).

Экспериментальная установка

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 7.4. Металлическая труба 3 длиной l и наружным диаметром D может быть установлена и зафиксирована в горизонтальном или вертикальном положении. Внутри трубы установлен электронагревательный элемент 4. Мощность теплового потока измеряется ваттметром 2 и может изменяться регулятором напряжения 1. Для измерения температуры наружной поверхности трубы на ней

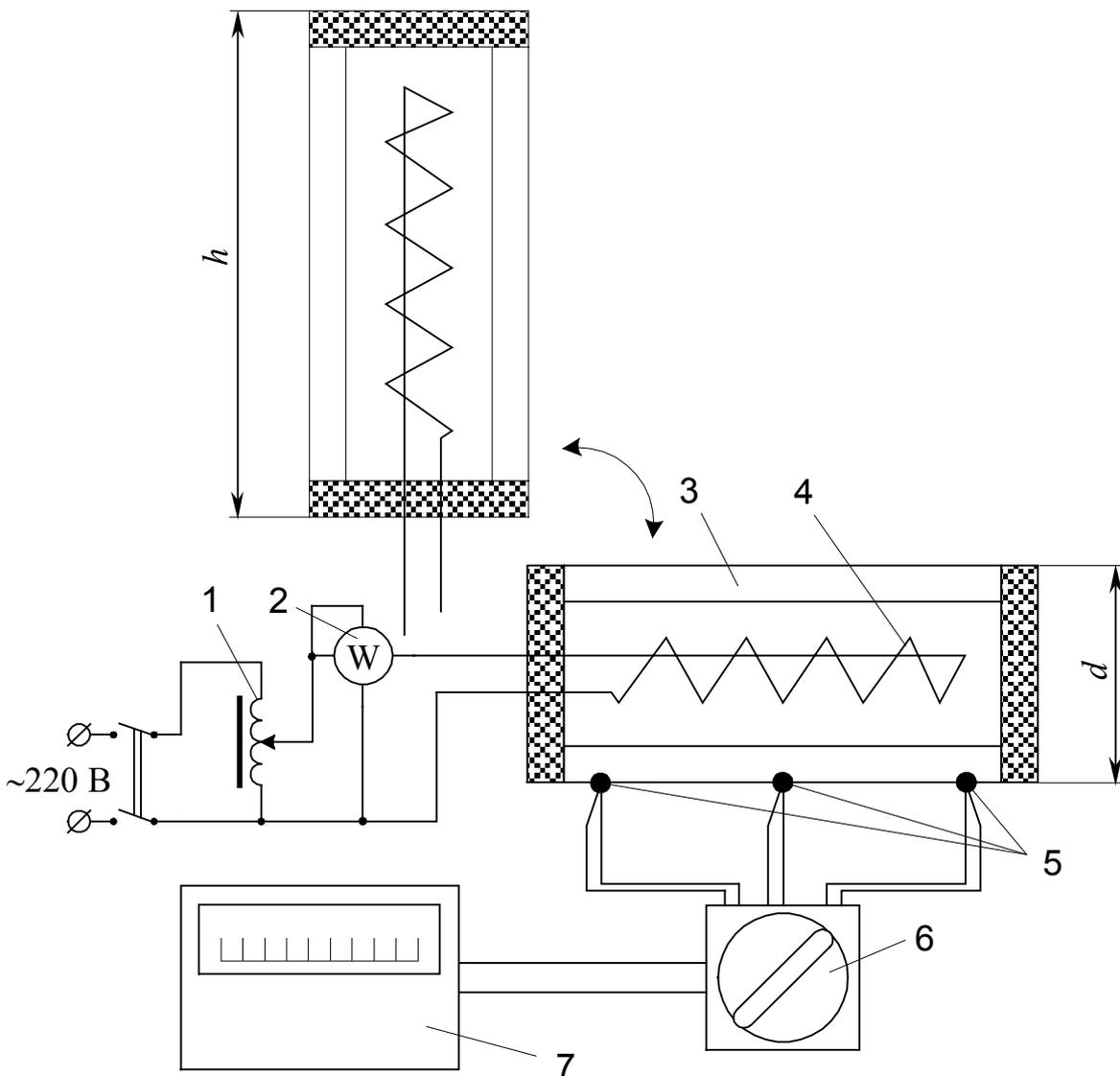


Рис. 7.4. Схема экспериментальной установки

Таблица 7.2

Протокол наблюдений (положение трубы – вертикальное)

Номер опыта	Мощность нагревателя W , Вт	Показания термопар, °С			Температура поверхности трубы средняя		Температура воздуха		Температурный напор ΔT , °С
		T_1	T_2	T_3	$T_{ст}$, °С	$T_{ст}$, К	$T_{ж}$, °С	$T_{ж}$, К	

Обработка опытных данных

Для обоих положений трубы (горизонтального и вертикального), для каждого из трех режимов по результатам третьего измерения выполнить следующее:

1. Подсчитать среднюю температуру поверхности трубы $T_{ст}$ как среднее арифметическое показаний всех трех термопар, а также температурный напор ΔT . Полученные значения занести в протокол наблюдений.

2. Вычислить коэффициент теплоотдачи по формуле, Вт/(м²·К),

$$\alpha = Q / [F(T_{ст} - T_{ж})],$$

где $Q = W$ – мощность теплового потока, Вт; $F = \pi D l$ – площадь поверхности трубы, м². Полученный по этому уравнению коэффициент теплоотдачи представляет собой сумму коэффициентов теплоотдачи конвекцией $\alpha_{к}$ и излучением $\alpha_{л}$ от нагретой трубы к окружающей среде.

3. Вычислить коэффициент теплоотдачи излучением по формуле, Вт/(м²·К),

$$\alpha_{л} = \varepsilon C_0 \left[\left(\frac{T_{ст}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{ж}}{100} \right)^4 \right] / (T_{ст} - T_{ж}),$$

где ε – степень черноты поверхности трубы, равная 0,28; C_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела, равный 5,67 Вт/(м²·К⁴).

4. Определить экспериментальное значение коэффициента теплоотдачи конвекцией, Вт/(м²·К),

$$\alpha_K^{\text{э}} = \alpha - \alpha_{\text{л}}.$$

5. Найти коэффициент теплоотдачи конвекцией расчетным путем, для чего сначала по уравнению (7.2) определить значение критерия Нуссельта, предварительно вычислив значение критерия Грасгофа, а затем из выражения (7.1) коэффициент теплоотдачи конвекцией. Сравнить полученное значение $\alpha_K^{\text{расч}}$ с экспериментальным.

Физические константы воздуха, входящие в критерии, выбираются по табл. 4 приложения. Определяющей температурой является температура вдали от стенки, т. е. $T_{\text{ж}}$. Значение критерия Прандтля принять равным 0,7. Определяющий размер – диаметр или высота трубы. Коэффициент объемного расширения воздуха $\beta = 1/(T_{\text{ж}} \text{ } ^\circ\text{C} + 273,15)$. Результаты обработки опытных данных свести в табл. 7.3.

Таблица 7.3

Результаты обработки опытных данных

Номер режима	$Q, \text{ Вт}$	α	$\alpha_{\text{л}}$	$\alpha_K^{\text{э}}$	$\lambda_{\text{ж}}, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$	$v, \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$	Nu	Gr	Gr·Pr	$\alpha_K^{\text{расч}}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$
		$\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$								
Положение трубы – горизонтальное										
Положение трубы – вертикальное										

6. Для обоих положений трубы построить графики зависимостей коэффициентов теплоотдачи α_K и $\alpha_K^{\text{расч}}$ от температурного напора. Сравнить значения α_K и $\alpha_K^{\text{расч}}$ для горизонтального и вертикального положений трубы. Сделать выводы по работе.

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 № 8

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОТДАЧИ ОРЕБРЕННОЙ ПОВЕРХНОСТИ

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

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 омывающим ее газом (жидкостью). Тепловой поток, отводимый жидкостью от поверхности, Вт

$$Q = \alpha F (\bar{T}_n - T_{ж}),$$

где α – средний для всей поверхности коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); F – величина поверхности, м²; \bar{T}_n – среднеинтегральная температура поверхности, К; $T_{ж}$ – температура жидкости вдали от поверхности, К.

Часто требуется интенсифицировать теплоотдачу, не изменяя температурные уровни поверхности и охлаждающей жидкости. 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 жидкостью.

На рис. 8.1 приведена схема распределения температуры по такому ребру, из которой видно, что по высоте ребра температура уменьшается от значения $T_{рн}$ у основания ребра до значения $T_{рк}$ на конце ребра вследствие отвода теплоты по всей его поверхности.

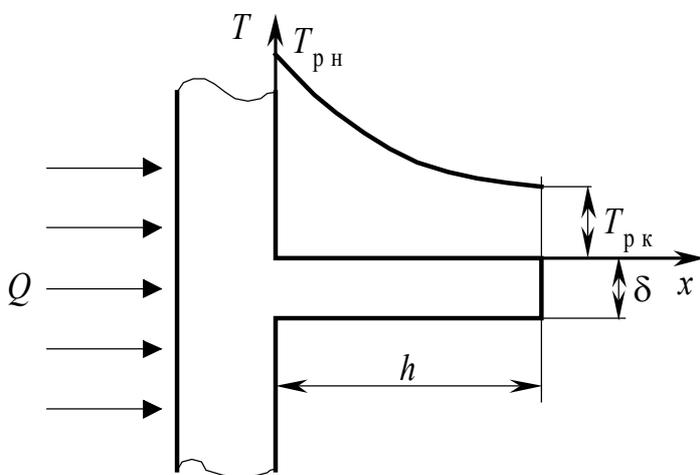


Рис. 8.1. Распределение температуры по ребру

Очевидно, что высота ребра h должна быть такой, чтобы существовала ненулевая разность между температурой конца ребра $T_{рк}$ и температурой омывающей ребро жидкости $T_{ж}$. В противном случае конечная часть ребра не будет “работать” в тепловом отношении, что приведет к бесполезному расходу металла.

Тепловой поток Q , отводимый от оребренной поверхности омывающей жидкостью, определяется как, Вт,

$$Q = \alpha F_{ор} (\bar{T}_{п} - T_{ж}) ,$$

где α – среднеинтегральное значение коэффициента теплоотдачи от оребренной поверхности к жидкости, Вт/(м²·К); $F_{ор}$ – площадь оребренной поверхности теплообмена, м²; $\bar{T}_{п}$ – среднеинтегральная температура оребренной поверхности, К; $T_{ж}$ – температура жидкости, К. В практике расчетов возникает достаточно сложная задача определения величины $\bar{T}_{п}$, поэтому часто пользуются не упомянутой формулой, а следующей ее модификацией:

$$Q = \alpha F_{ор} E_H (T_{пн} - T_{ж}) . \tag{8.1}$$

В этой формуле величина E_H равна

$$E_H = (\bar{T}_H - T_{ж}) / (T_{пн} - T_{ж}) ,$$

а называется она КПД оребрения или коэффициентом эффективности оребренной поверхности (ребер и несущей их поверхности) и показывает, во сколько раз применение оребрения снижает температурный напор между несущей поверхностью и омывающей ее жидкостью; $T_{пн}$ – температура несущей поверхности.

Коэффициент эффективности оребренной поверхности может быть также выражен формулой

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

в которой $\beta = F_{ор} / F_H$ – степень оребрения, равная отношению величины всей площади оребрения к площади несущей поверхности без ребер; E_p – коэффициент эффективности ребра (КПД ребра), определяемый как

$$E_p = (\bar{T}_p - T_{ж}) / (T_{пн} - T_{ж}) \quad (8.3)$$

и показывающий, во сколько раз температурный напор между ребром и омываемой его жидкостью меньше температурного напора между несущей поверхностью и жидкостью.

Экспериментальная установка

Схема установки приведена на рис. 8.2. Несущая пластина 8 имеет плоские ребра 5. Степень оребрения такой поверхности

$$\beta = F_{ор} / F_H = (ab + 2nhb + 2nhc) / (ab) , \quad (8.4)$$

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.

4. Определить среднюю температуру ребра

$$\bar{T}_p = (T_{\text{пн}} + T_2 + T_3 + T_{\text{рк}})/4 .$$

5. Используя уравнение (8.4), определить параметры исследуемой поверхности $F_{\text{ор}}$, $F_{\text{н}}$, β .

6. Определить КПД ребра E_p и КПД оребрения E_n соответственно по уравнениям (8.3) и (8.2).

7. Определить коэффициент теплоотдачи α оребренной поверхности по уравнению (8.1). Результаты расчета занести в таблицу.

8. Повторить эксперимент по пунктам 1-7 при включенном вентиляторе обдува.

9. 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 оребрения 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.
9. Как экспериментально определить коэффициент теплоотдачи оребренной поверхности?

Лабораторная работа № 9

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТЕПЕНИ ЧЕРНОТЫ РЕАЛЬНОГО ТЕЛА МЕТОДОМ СРАВНЕНИЯ С ЭТАЛОННЫМ

Назначение работы. Углубление знаний по теории теплового излучения, ознакомление с методикой определения степени черноты твердого тела.

Задание:

1. Определить степень черноты поверхности стального цилиндра методом сравнения с эталонным и сравнить его с табличным значением.

2. Определить относительную ошибку экспериментально найденной степени черноты стали.

3. Составить отчет по выполненной работе.

Основные понятия

Известно, что носителями лучистой энергии являются электромагнитные колебания очень широкого диапазона длин волн. В зависимости от диапазона такие излучения известны под названием: рентгеновские, ультрафиолетовые, световые, инфракрасные, радиочастотные др. Это деление сложилось исторически, в действительности какой-либо резкой физической границы по длинам волн не существует.

С квантовой точки зрения излучение представляет собой поток фотонов, энергия которых равна $h\nu$, где $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка и ν – частота колебаний эквивалентного электромагнитного поля. Длина волны связана с частотой соотношением $\lambda\nu = c$, 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 E , излучаемый с единицы поверхности по всем направлениям полусферического пространства, называется плотностью потока излучения или интегральным излучением.

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. 9.1) 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 поглотительную, R – отражательную и D – пропускательную 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 $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$ 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 5,67 Вт/(м²·К⁴).

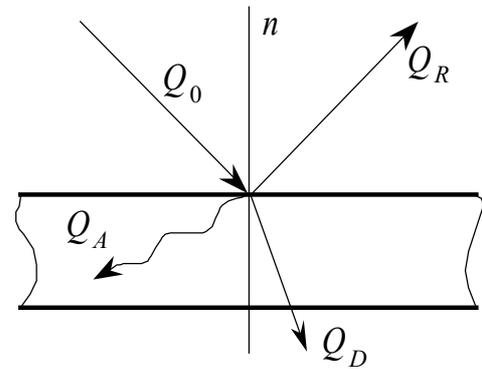


Рис. 9.1. Распределение энергии, падающей на тело

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 $5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$.

Степень черноты ε реальных тел с использованием понятия коэффициента излучения определяется как

$$\varepsilon = C/C_0$$

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 тел, участвующих в теплообмене излучением (для газа – температура в его объеме), К ; $C_{\text{пр}}$ – приведенный коэффициент излучения двух тел, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$.

Экспериментальная установка

Экспериментальная установка (рис. 9.2) состоит из двух вертикально расположенных цилиндров. Рабочий цилиндр 3 выполнен из стали, эталонный 6 – из латуни. Оба цилиндра имеют длину 0,345 м и диаметр 0,04 м. Внутри каждого из цилиндров расположены электронагреватели 4 и 7, питающиеся переменным током от сети. Для измерения мощности теплового потока, изменяемой регуляторами 1 и 9, в их цепях установлены ваттметры 2 и 8. Температура излучающих поверхностей цилиндров измеряется термомпарами ТХК 11 и 14. Термомпары присоединены через переключатели 10 и 13 к потенциометру 12. Цилиндры расположены открыто и свободно омываются окружающим воздухом. Для исключения влияния теплоотдачи от одного цилиндра к другому они разделены экраном 5. Степень черноты стали $\varepsilon_{\text{ст}}$ определяется методом сравнения теплоотдачи на стационарном режиме двух геометрически подобных цилиндров при условии равенства средних температур их поверхностей. В этом случае интенсивность конвективного теплообмена между поверхностями цилиндров и окружающих

стен помещения лаборатории (именно между ними будет происходить лучистый теплообмен, так как воздух, состоящий из двухатомных газов, практически прозрачен для тепловых лучей) будет неодинакова вследствие различия коэффициентов излучения стали и латуни. Зная коэффициент излучения латуни ($C_{\text{л}}$), из выражения тепловых балансов цилиндров легко определить искомую величину.

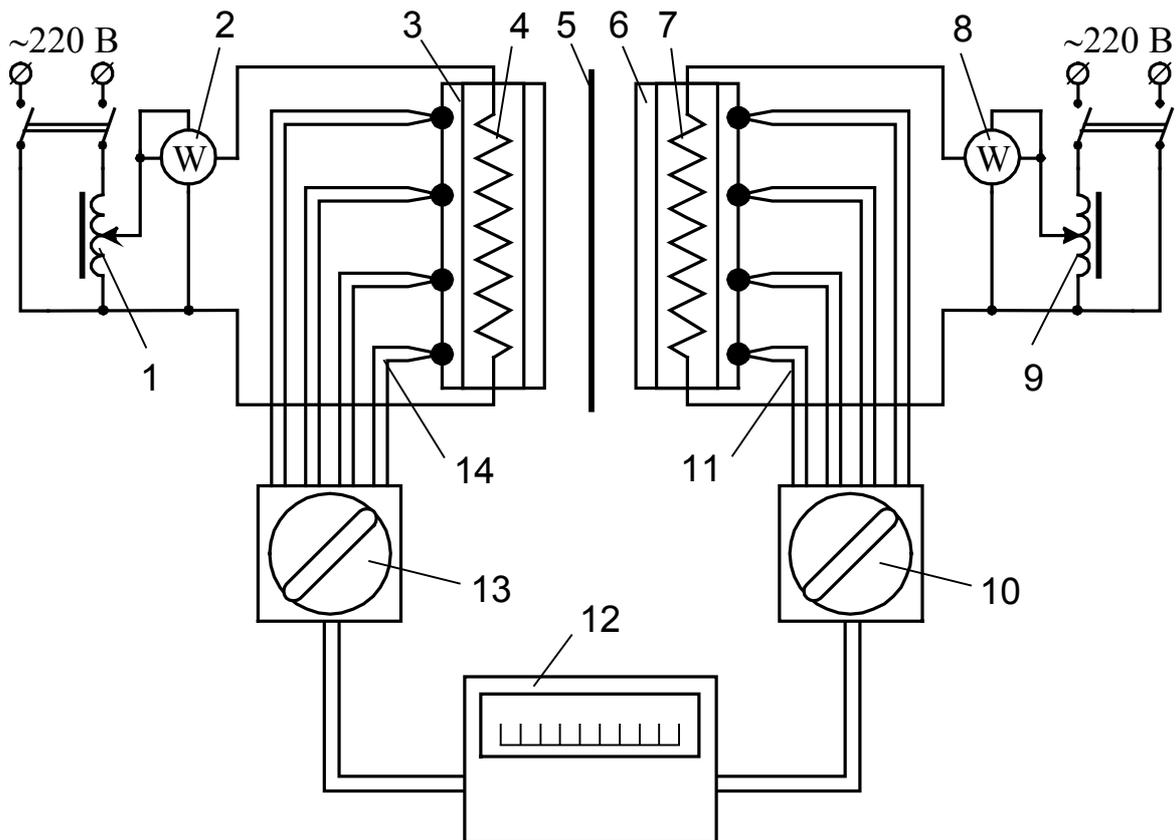


Рис. 9.2. Схема экспериментальной установки

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с описанием установки.
2. Включить установку в сеть переменного тока и регуляторами напряжения установить мощность нагревателей цилиндров *по указанию преподавателя*. Продолжать прогрев цилиндров до тех пор, пока режим не станет установившимся (температура стенки эталонного цилиндра $\bar{T}_{\text{л}}$ не будет изменяться).
3. Через 20 мин измерить температуру поверхностей цилиндров. Постепенно изменяя мощность нагревателя одного из цилиндров (стального), добиться одинаковой средней температуры поверхностей обоих цилиндров. Средняя температура каждого из цилиндров находится как среднее

арифметическое показаний всех четырех термопар. Каждую очередную регулировку мощности нагревателя проводить с интервалом 10 мин, записывая показания всех контрольно-измерительных приборов в таблицу.

4. После выравнивания температур поверхностей цилиндров и достижения установившегося режима теплообмена, на что будут указывать одинаковые значения средних температур на протяжении двух-трех замеров, опыт закончить и установку выключить.

5. Температура воздуха в помещении регистрируется по показаниям настенного термометра.

Протокол наблюдений

Время, мин.	Латунный цилиндр					Стальной цилиндр					$T_{\text{пом}},$ °C		
	Мощность $W_{\text{л}},$ Вт	Показания термопар, °C					Мощность $W_{\text{ст}},$ Вт	Показания термопар, °C					
		T_1	T_2	T_3	T_4	$\bar{T}_{\text{л}}$		T_1	T_2	T_3		T_4	$\bar{T}_{\text{ст}}$

Обработка опытных данных

1. Определить коэффициент излучения стали $C_{\text{ст}}$ из уравнения теплового баланса опытных цилиндров и стационарных условий их теплообмена

$$C_{\text{ст}} = \frac{C_{\text{л}} + \frac{1}{F_{\text{цил}}}(W_{\text{ст}} - W_{\text{л}})}{(T_{\text{ср}}/100)^4 - (T_{\text{пом}}/100)^4},$$

где $T_{\text{ср}}$ – средняя температура цилиндров, К; $W_{\text{ст}}$ и $W_{\text{л}}$ – соответственно мощности электронагревателей стального и латунного цилиндров, Вт; $T_{\text{пом}}$ – температура воздуха в помещении, К; $F_{\text{цил}}$ – поверхность цилиндра, м². $F_{\text{цил}} = \pi dl$, $d = 0,04$ м – диаметр, $l = 0,345$ м – длина цилиндра.

Коэффициент излучения латуни $C_{\text{л}}$ найти с использованием данных табл. 5 приложения по формуле: $C_{\text{л}} = \varepsilon_{\text{л}} C_0$.

2. Определить экспериментальное значение степени черноты стали по формуле:

$$\varepsilon'_{\text{ст}} = C_{\text{ст}}/C_0 .$$

3. По табл. 5 приложения выбрать степень черноты стали $\varepsilon_{\text{ст}}$ и определить относительную ошибку δ экспериментальных данных:

$$\delta = \frac{\varepsilon_{\text{ст}} - \varepsilon'_{\text{ст}}}{\varepsilon_{\text{ст}}} 100\% .$$

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 цилиндр подвергнуть более тщательной механической обработке (например, отполировать наружную поверхность)?
5. Как уменьшить систематические ошибки в эксперименте?
6. Сущность законов Планка, Вина, Кирхгофа.
7. Каковы различия между излучением твердых тел и газов?

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_{pt}	c_{vt}	c'_{pt}	c'_{vt}	μc_{pt}	μc_{vt}
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	$i, \text{кДж/кг}$	$u, \text{кДж/кг}$
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. “мокро- го” 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	

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. **Гоц А.Н., Горнушкин Ю.Г.** Погрешности измерений при испытаниях двигателей внутреннего сгорания. – Владимир: ВлГУ, 2003. – 76 с.
2. **Иванова Г.М., Кузнецов Н.Д., Чистяков В.С.** Теплотехнические измерения и приборы. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 230 с.
3. **Исаев С.И.** Теория тепломассообмена: Учеб. для энергомашиностроит. спец. вузов / С.И. Исаев, И.А. Кожин, В.И. Кофанов и др.; Под ред. А.И. Леонтьева. – М.: Высш. шк., 1979. – 495 с.
4. **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.
5. **Михеев М.А., Михеева И.М.** Основы теплопередачи. – М.: Энергия, 1977. – 344 с.
6. **Сергеев А.Г., Крохин В.В.** Метрология. – М.: Логос, 2000. – 408 с.
7. **Теплотехника:** Учеб. для вузов / В.Н. Луканин, М.Г. Шатров, Г.М. Камфер и др.; Под ред. В.Н. Луканина. – М.: Высш. шк., 2000. – 671 с.
8. **Тихомиров К.В.** Теплотехника, теплогазоснабжение и вентиляция. – М.: Стройиздат, 1984. – 274 с.
9. **Юдаев Б.Н.** Теплопередача. – М.: Высш. шк., 1981. – 320 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Требования к выполнению и оформлению лабораторных работ	3
Понятия о погрешностях измерений.....	4
<i>Лабораторная работа № 1. Исследование изохорного процесса</i>	5
<i>Лабораторная работа № 2. Определение показателя политропы</i> расширения воздуха	10
<i>Лабораторная работа № 3. Определение теплоемкости воздуха</i>	14
<i>Лабораторная работа № 4. Исследование процессов во влажном</i> воздухе	20
<i>Лабораторная работа № 5. Определение отопительного коэффициента</i> теплового насоса	29
<i>Лабораторная работа № 6. Определение коэффициента теплопровод-</i> ности теплоизоляционных материалов	33
<i>Лабораторная работа № 7. Исследование теплоотдачи трубы при сво-</i> бодной конвекции	38
<i>Лабораторная работа № 8. Определение теплоотдачи ребренной по-</i> верхности	47
<i>Лабораторная работа № 9. Определение степени черноты реального</i> тела методом сравнения с эталонным	51
Приложение	58
Библиографический список	62

Учебное издание

АБРАМОВ Павел Валериевич
БАСУРОВ Виктор Михайлович
ГОРНУШКИН Юрий Георгиевич
и др.

ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА
И ТЕОРИЯ ТЕПЛООБМЕНА
Лабораторный практикум

Редактор Е.В. Невская
Компьютерная верстка П.В. Абрамов

ЛР № 020275. Подписано в печать 25.04.03.
Формат 60×84/16. Бумага для множит. техники. Гарнитура Таймс.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 3,72. Уч.-изд. л. 3,95. Тираж 150 экз.

Заказ

Редакционно-издательский комплекс
Владимирского государственного университета.
600000, Владимир, ул. Горького, 87.