

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«БРЕСТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Кафедра водоснабжения, водоотведения и теплоснабжения

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению лабораторных работ по дисциплине
"Инженерные сети и оборудование"
для студентов
специальностей 70 02 01, 70 04 03, 37 01 06, 53 01 01
дневной и заочной форм обучения

Брест 2005

УДК 697.911 (075.8)

Методические указания предназначены для студентов специальностей 70 02 01, 70 04 03, 37 01 06, 53 01 01 дневной и заочной форм обучения по дисциплине "Инженерные сети и оборудование".

Составители: В.С. Северянин, д.т.н., профессор
М. Г. Горбачева, доцент
И.А. Черников, к.т.н., ст. преподаватель

Рецензенты: зам. директора дочернего унитарного предприятия
"Белкоммунпроект" – Р.И. Вовк

ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ И СДАЧИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

1. Перед проведением лабораторных работ студенты проходят инструктаж по технике безопасности, что отмечается в соответствующем журнале.
2. Студенты должны быть ознакомлены с правилами технической эксплуатации оборудования и КИП лаборатории теплотехники.
3. В течение двух академических часов, отведенных на занятия, студент обязан изучить методические указания, провести соответствующий эксперимент, обработать опытные данные, проработать контрольные вопросы, изложенные в указаниях, составить индивидуальный отчет и защитить работу.
4. Отчет о работе должен содержать:
название, цель работы, основные положения теории, схему экспериментальной установки и методику проведения опытов, экспериментальные данные, результаты их обработки, анализ и выводы.
5. В методических указаниях приведены схемы экспериментальных установок, весь остальной графический материал показан на соответствующих стендах.
6. Защита работы заключается в объяснении эксперимента, полученных данных и формулировании выводов перед преподавателем. Защищенная работа является зачетом по ней.
7. Для углубления знаний по теме путем самостоятельной работы приводится список литературы в конце методического указания.

РАБОТА № 1.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОТДАЧИ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ТРУБЫ ПРИ ЕСТЕСТВЕННОЙ КОНВЕКЦИИ

Цель работы: усвоить физические основы процесса, экспериментально определить коэффициент теплоотдачи, рассчитать его значение по критериальным зависимостям, проанализировать полученные результаты.

Физические основы процесса.

Конвективный теплообмен – это перенос теплоты перемещающимися частицами с разной температурой. Теплоотдача является частным случаем конвективного теплообмена, это процесс переноса теплоты от нагретой стенки к омывающему ее воздуху, т.е. теплообмен на границе раздела: твердое тело-воздух (жидкость). Если движение жидкости происходит за счет внешних сил (компрессоров, насосов), конвекция называется вынужденной. При естественной конвекции движение воздуха у стенки происходит за счет неоднородности поля массовых сил, обусловленных неоднородностью поля температур в воздухе (жидкости). В этом случае на рассматриваемый объем воздуха вблизи стенки действует две силы: сила тяжести и сила выталкивания. За счет разности указанных сил возникает естественное движение жидкости вверх, т.к. нагретый воздух легче холодного.

Удельный поток q и общий Q при теплоотдаче определяют по уравнению Ньютона:

$$q = \alpha (t_c - t_0), \text{ Вт/м}^2; \quad (1)$$

$$Q = q \cdot F, \text{ Вт}; \quad (2)$$

$$\text{количество переданной теплоты } Q = q \cdot F \cdot \tau, \text{ Дж}; \quad (3)$$

где α - коэффициент пропорциональности, называемый коэффициентом теплоотдачи, Вт/(м²);

t_c - температура стенки, °С;

t_0 - температура окружающей среды, °С;

F - площадь поверхности, м²;

τ - время (продолжительность процесса) теплоотдачи, сек.

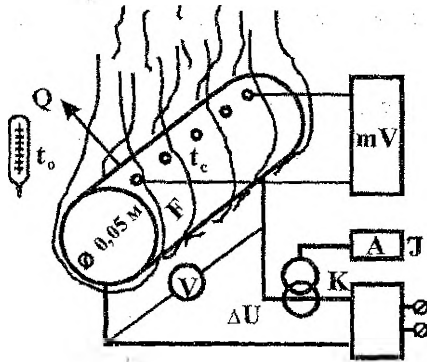
Из уравнений (1-3) следует, что коэффициент теплоотдачи численно равен теплоте, переносимой в единицу времени через единицу поверхности при единичной разности температур между поверхностью и воздухом (жидкостью).

Теоретически α рассчитать трудно, поэтому α обычно определяется экспериментально, или, в обобщенном случае – при помощи критериальных уравнений.

Опытная установка и методика экспериментального определения коэффициента теплоотдачи

Рабочим участком экспериментальной установки является тонкостенная стальная труба, установленная горизонтально. Площадь поверхности трубы $F = 0,105 \text{ м}^2$. Труба нагревается за счет прямого прохождения через нее электрического тока.

Для измерения средней температуры по длине трубы на наружной поверхности трубы расположены датчики термоэлектрического термометра (термопары). Зависимость э.д.с., возникающей в результате термоэлектрического эффекта, от температуры стенки трубы, представлена графиком на стенде.



На рисунке обозначено:
 mV – милливольтметр, А – амперметр,
 К – трансформатор, V – вольтметр,
 Q – тепловой поток.

Методика проведения опытов и обработки опытных данных

Из уравнения (1) следует, что коэффициент теплоотдачи в стационарном режиме

$$\alpha = Q / [(t_c - t_0) F], \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}). \quad (4)$$

Стационарный режим достигается тогда, когда прекращается нагрев трубы, и вся подводимая энергия полностью рассеивается в окружающую среду.

Подводимая к трубе мощность электрического тока Q определяется по силе тока и падению напряжения на торцах трубы:

$$Q = I \cdot \Delta U \cdot K, \text{ Вт} \quad (5)$$

где K - коэффициент трансформации тока ($K = 100$).

Порядок проведения опыта

При достижении стационарного режима снимаются показания милливольтметра, амперметра, вольтметра, определяется температура в комнате, и по выражениям (4, 5) при помощи стендовых графиков вычисляется α .

Расчет коэффициента теплоотдачи

Для определения коэффициента теплоотдачи при естественной конвекции для круглой трубы расчетное уравнение имеет следующий вид:

$$Nu = c (Gr \cdot Pr)^n, \quad (6)$$

где Nu - критерий Нуссельта.

$$Nu = \frac{\alpha \cdot d}{\lambda}, \quad (7)$$

откуда $\alpha = \frac{N \cdot \lambda}{d}$.

В уравнении (6):

c и n - коэффициенты, зависящие от режима естественной конвекции (см. табл. 1);

Gr - число Грасгофа, отражающее интенсивность естественной конвекции:

$$Gr = \beta g d^3 \Delta t / \nu^2; \quad (8)$$

Pr - число Прандтля, характеризующее влияние физических свойств жидкости на теплоотдачу ($Pr = 0,7$).

В уравнении (5, 6):

$\beta = 1/\bar{t}$ - коэффициент объемного расширения воздуха, $1/K$;

\bar{t} - определяющая температура, $\bar{t} = 0,5(t_c + t_o) + 273, K$;

g - ускорение свободного падения, m/c^2 ;

ν - кинематический коэффициент вязкости воздуха (принимаемый по t , $^{\circ}C$), $\nu = 0,5(t_c + t_o)$, (см. график на стенде);

λ - коэффициент теплопроводности воздуха (принимаемый по t , $^{\circ}C$), (см. график на стенде);

d - диаметр трубы, m ($d = 0,05$).

Таблица 1. Значение величин c и n в формуле (5)

$Gr \cdot Pr$	c	n
10...5·10 ²	1,18	1/8
5·10 ² ...2·10 ⁷	0,54	1/4
2·10 ⁷ ...1 x 10 ¹²	0,135	1/3

Определив по уравнению (6) значение критерия Nu , находят значение коэффициента теплоотдачи α , и сопоставляют его с экспериментальным значением α .

Контрольные вопросы.

1. Дайте определение конвективному теплообмену и теплоотдаче как физическому процессу.

2. Чем отличается естественная конвекция от вынужденной?

3. Напишите и поясните уравнение Ньютона для теплоотдачи.

Литература [3], стр. 216

РАБОТА № 2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

Цель работы: ознакомление с методами экспериментального определения коэффициента теплопроводности, получение и анализ практических результатов.

Основные положения теории

Теплопроводность - распространение тепла путем непосредственного контакта неподвижных частиц с разной температурой.

Дифференциальное уравнение трехмерного нестационарного температурного поля (без источников и поглотителей тепла в теле), т.е. изменение температуры в пространстве и времени:

$$dT/d\tau = a(d^2T/dx^2 + d^2T/dy^2 + d^2T/dz^2) = a\nabla^2 T,$$

где T - температура, τ - текущее время, x, y, z - координаты данной точки.

Временные и пространственные функции здесь связаны множителем a , который называется коэффициентом теплопроводности:

$$a = \lambda / (c \cdot \rho),$$

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

ρ - плотность вещества, кг/м³;

c - удельная теплоемкость вещества, Дж/(кг·К).

Приведенное выше обобщенное дифференциальное уравнение теплопроводности решается заданием краевых (начальных и граничных) условий.

Так, для одномерного стационарного (не изменяющегося во времени) температурного поля решение имеет вид математического выражения закона Фурье:

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

где q - удельный тепловой поток, т.е. общий тепловой поток Q , отнесенный к единице сечения F , через которое проходит тепло ($q = Q/F$).

Законом Фурье представлена важность коэффициента пропорциональности λ - коэффициента теплопроводности, который связывает величину теплового потока с интенсивностью изменения температуры в пространстве.

Знание λ необходимо для определения тепловых потоков через тела (тепловые потери через строительные конструкции, нагрев и охлаждение деталей при термической и механической обработке, вычисление температур в грунте, в стене и т. д.).

Аналитически λ можно вычислить только для простейших случаев, с рядом допущений. Поэтому λ в основном определяется экспериментально, составляются таблицы теплофизических свойств материалов, которыми пользуются конструкторы и исследователи.

Экспериментальные методы определения разделяются на стационарные и нестационарные. Стационарные основаны на законе Фурье:

$$\lambda = Q / [(t_1 - t_2) K^{\Phi}],$$

где λ - для $t = 0,5 (t_1 - t_2)$, °С;

t_1, t_2 - температуры точек, через который идет Q ;

Q - тепловой поток через слой, ограниченный изотермами t_1 и t_2 ;

K^{Φ} - коэффициент формы, для плоского, цилиндрического, шарового слоя соответственно:

$$K_{\text{пл}}^{\Phi} = F / \delta; K_{\text{ц}}^{\Phi} = 2\pi l / \ln(d_2 / d_1); K_{\text{ш}}^{\Phi} = 2\pi / (1/d_1 - 1/d_2);$$

где F - поверхность плоского слоя, нормальная к Q ;

δ - его толщина;

l - длина цилиндра;

d_1 и d_2 - внутренний и наружный диаметр цилиндрического и сферического слоя.

Общий принцип стационарных методов сводится к измерению Q и перепада температур на слое. Известны следующие варианты этих методов: 1) метод плоского слоя (исследуемое вещество находится между параллельными плоскостями, температура которых измеряется); 2) метод шара (шаровой слой, неучтенные тепловые потоки сведены к минимуму); 3) метод коаксиальных цилиндров (слой между цилиндрами, во внутреннем цилиндре - нагреватель); 4) метод нагретой нити (нить в цилиндре служит нагревателем и термометром сопротивления для определения внутренней температуры).

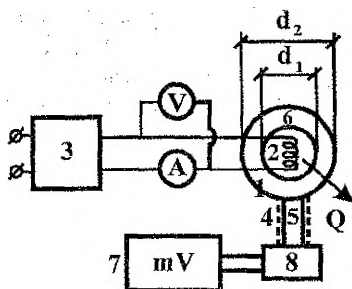
Тепловые потоки, как правило, создаются электрическими нагревателями и поэтому легко определяются.

Нестационарные методы основаны на теории теплопроводности при нестационарном тепловом потоке: 1) метод регулярного теплового режима (предварительно нагретый слой охлаждается с одной стороны, измеряются избыточные температуры на ограничивающих поверхностях в данный момент времени, далее определяется темп охлаждения и рассчитывается коэффициент теплопроводности); 2) метод слоя в монотонном режиме; 3) нестационарный метод нагретой нити; 4) метод периодического нагрева; 5) метод ударной волны (для газов при высокой температуре). Эти методы обладают рядом достоинств (не нужно измерять тепловые потоки, уменьшение длительности эксперимента, снижение требований к тепловой защите) и недостатков (сложность расчетов, оценки соответствия действительных граничных условий с расчетными).

На практике чаще используются стационарные методы, которые могут быть абсолютными (определение всех величин непосредственным измерением) и относительными (сравнение с эталоном). Последние методы предпочтительнее, т.к. непосредственное измерение дает больше погрешностей.

В данной работе используется стационарный абсолютный метод шара для определения λ сыпучего материала (кварцевый песок).

Схема экспериментальной установки



Лабораторная установка состоит из двух тонкостенных шаров. Во внутреннем шаре 1 расположен электрический нагреватель 2, потребляемая мощность подсчитывается по показаниям вольтметра и амперметра. Изменение мощности производится с помощью автотрансформатора 3. Для измерения температуры поверхности шаров служат две термопары 4, 5, выполненные из хромеля и алюмеля. При плотной засыпке исследуемого сыпучего материала (песка) 6 можно считать, что температу-

ра его слоя, непосредственно прилегающего к поверхности металлической стенки шаров, равна температуре этой стенки. Э.д.с. термопар измеряется прибором 7 с переключателем 8. По зависимости э.д.с. = $f(t)$ определяется температура, к которой добавляется температура в помещении, эта сумма есть искомая температура t_1 или t_2 в зависимости от положения тумблера переключателя (см. графики на стенде).

Проведение опыта.

Через каждые 10 - 15 мин. производится запись (3-5 раз) всех показаний измерительных приборов до наступления установившегося теплового состояния системы. Для обработки можно использовать лишь данные, полученные при установившемся тепловом состоянии системы. Коэффициент теплопроводности исследуемого материала вычисляется по уравнению теплопроводности:

$$\lambda = \frac{Q(1/r_1 - 1/r_2)}{4\pi(t_1 - t_2)}, \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}.$$

Тепловой поток определяется по расходу электроэнергии, измеренному приборами:

$$Q = I \cdot U, \text{ Вт};$$

где r_1, r_2 - радиусы внутреннего и внешнего шаров соответственно, м;

t_1, t_2 - температура поверхностей внутреннего и внешнего шаров соответственно, °С.

Полученное значение коэффициента теплопроводности следует относить к средней температуре исследуемого материала.

Таблица опытных и расчётных данных.

№ опыта	Сила тока $I, \text{ А}$	Напряжение $U, \text{ В}$	Температуры сфер		$\lambda,$ Вт/(м·К)
			$t_1, \text{ °С}$	$t_2, \text{ °С}$	
1	2	3	4	5	6

Контрольные вопросы.

1. Что такое теплопроводность? Напишите и поясните уравнение Фурье.
2. Дайте определение коэффициента теплопроводности.
3. Перечислите основные способы определения коэффициента теплопроводности.
4. Как изменится коэффициент теплопроводности исследуемого материала с увеличением его влагосодержания и плотности?

Литература [4] стр. 23.

РАБОТА № 3

ИССЛЕДОВАНИЕ ЕСТЕСТВЕННОЙ ВЫТЯЖНОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ

Цель работы: ознакомление с принципом работы канальной вытяжной естественной вентиляционной системы и ее исследование в заданных режимах тепловыделения и открытия приточного отверстия.

Теория вопроса

Канальная естественная система вытяжной вентиляции позволяет осуществлять воздухообмен в помещении. Она состоит из вертикальных внутрискатных или приставных каналов с отверстиями, обращенными вовнутрь помещений и закрытыми жалюзийными решетками, сборных горизонтальных воздуховодов и вытяжной шахты. Перемещение воздуха по вентиляционной системе происходит благодаря естественному давлению, возникающему за счет разности плотностей наружного холодного и внутреннего теплого воздуха. Величина естественного давления определяется по формуле:

$$\Delta P_e = h g (\rho_n - \rho_e), \text{ Па};$$

где h - высота воздушного столба, принимаемая от середины вытяжного отверстия до устья вытяжной шахты, м;

ρ_n - плотность наружного воздуха (в расчетах принимается плотность воздуха лаборатории), кг/м³;

ρ_e - плотность внутреннего воздуха вентилируемого помещения, кг/м³ (см. график на стенде).

Естественное давление ΔP_e затрачивается на преодоление сопротивления трения и местных сопротивлений, возникающих при движении воздуха в системе. Сопротивление трения воздуха о стенки канала (или потери на трение):

$$P_T = \sum \left(\frac{\lambda}{d} \cdot \frac{W^2}{2} \cdot \rho \cdot l \right), \text{ Па.}$$

Потери давления на местные сопротивления:

$$Z = \sum \left(\zeta \cdot \frac{W^2}{2} \cdot \rho \right), \text{ Па.}$$

где λ - коэффициент гидравлического трения;

d - диаметр канала (воздуховода), м;

W - скорость движения воздуха, м/с;

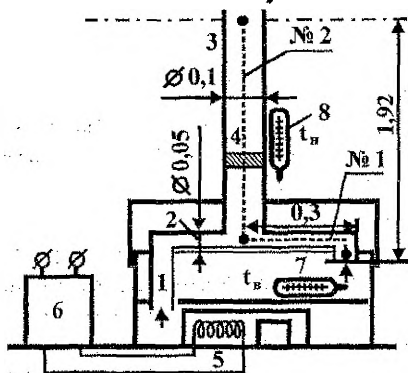
ρ - плотность движущегося воздуха, кг/м³,

ζ - сумма коэффициентов местных сопротивлений в данном канале.

Для нормальной работы естественной канальной системы вентиляции необходимо, чтобы суммарные потери давления на трение и местные сопротивления во всей расчетной ветви системы были не более располагаемого давления:

$$\sum (P_T + Z) \approx \Delta P_e.$$

Опытная установка и методика проведения опытов



Экспериментальная установка представляет собой модель жилого одноэтажного дома с вытяжной естественной канальной системой вентиляции с объединенными каналами. Теплый воздух удаляется по вертикальным каналам 1, горизонтальному воздуховоду 2 и вытяжной шахте 3.

Естественное давление ΔP_e является наименьшим для вентиляционного канала обслуживающего второй этаж, поэтому расчет вентиляционной системы производим через вентканал второго этажа, который работает в наиболее неблагоприятных условиях (участок № 1, № 2). Подогрев воздуха внутри дома до температуры t_w обеспечивается электронагревателем 5 и регулируется лабораторным автотрансформатором 6. Температуры воздуха t_w и t_n определяются термометрами 7 и 8.

В процессе выполнения лабораторной работы следует экспериментально определить скорость движущегося воздуха на расчетных участках вентиляционной сети, температуру воздуха внутри дома t_w и вне его t_n . Скорость движения воздуха измеряется предварительно протарированным анемометром 4. Горизонтальный участок № 1, вертикальный участок № 2.

По заданию преподавателя установить напряжение на нагревателе 5 при помощи автотрансформатора 6. При установившемся тепловом режиме измерить температуры t_a и t_n , определить скорость движения воздуха в шахте (W_2 – участок № 2) по графику зависимости скорости воздуха W от числа оборотов анемометра n_2 . На участке № 2 скорость движения воздуха в горизонтальном канале сети при подобранном соотношении диаметров шахты и этих каналов вдвое больше, чем в шахте. Опыты проводятся при заданных тепловых режимах и степени открытия приточного отверстия. Результаты измерений заносятся в таблицу. Плотность воздуха для температур t_a и t_n определяется по графику $\rho = f(t)$. Коэффициенты местных сопротивлений в вентиляционной системе следует принять:

- а) вход с поворотом $\zeta_1 = 0,5$;
- б) колено под углом 90° $\zeta_2 = 1,1$;
- в) тройник поворот $\zeta_3 = 0,6$;
- г) выход из вентиляционной шахты $\zeta_4 = 0,6$;
- д) анемометр $\zeta_5 = 140$;
- е) вход в помещение $\zeta_6 = 50$.

Коэффициент гидравлического трения для стальных труб $\lambda = 0,01$; диаметр канала $d_{\text{канала}} = 0,05$ м; $d_{\text{шахты}} = 0,1$ м; $h_{\text{шахты}} = 1,92$ м.

Таблица опытных и расчетных данных.

№ участков	Температура воздуха внутри помещения t_a , °С	Температура наружного воздуха (в лаборатории) t_n , °С	Плотность теплового воздуха ρ_a , кг/м ³	Плотность наружного воздуха ρ_n , кг/м ³	Естественное давление ΔP_6 , Па	Число оборотов анемометра n , об/мин	Скорость воздуха на участке W , м/с	Потери давления на трение на участке P_f , Па	Сумма коэффициентов местного сопротивления	Потери давления на местные сопротивления Z , Па	Суммарные потери $P_T + Z$, Па
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1											
2											

Контрольные вопросы.

1. Дайте определение естественной канальной системы вентиляции.
2. Как найти действующее гравитационное давление в системе вентиляции?
3. От каких факторов зависит работа естественной канальной системы вентиляции?
4. Необходимое условие для нормальной работы естественной вентиляции?
5. Почему вертикальные вентканалы нельзя прокладывать в наружных стенах?

Литература [1], стр. 200; [2], стр. 212.

РАБОТА № 4

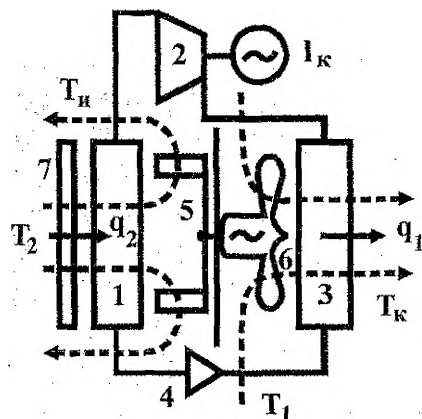
ИЗУЧЕНИЕ КОНСТРУКЦИИ И РАБОТЫ КОНДИЦИОНЕРА

Цель работы: получение знаний о кондиционерах и приобретение навыков их эксплуатации.

Кондиционирование воздуха - это поддержание заданных условий (англ. - condition) воздушного режима помещений (температура, влажность, чистота). Устройства, предназначенные для кондиционирования воздуха, называются кондиционерами. Они подразделяются на центральные - обслуживающие группу помещений, и местные - предназначенные для данного помещения и установленные в нем. В центральных кондиционерах температура и влажность поддерживаются калорифером и оросительными камерами. Автономные кондиционеры не требуют внешних тепло- и энергоносителей, кроме электроэнергии.

Устройство и термодинамика автономного кондиционера

Автономные кондиционеры создаются на базе термоэлектрических (аналог - термопары) или компрессионных холодильных установок. В настоящей работе изучается второй тип. Здесь в качестве рабочего тела используются хладагенты - жидкости с достаточно большой теплотой парообразования, кипящие при низких (+5...-50 °С) температурах и давлениях несколько больших атмосферного. Обычно это аммиак и фреоны.



Основными элементами установки (см. рис.) является испаритель 1, компрессор 2, конденсатор 3, дроссель 4, вентилятор внутреннего воздуха 5, вентилятор наружного воздуха 6, фильтр 7. В испарителе 1 (это оребренный трубчатый теплообменник, внутри трубок - фреон, снаружи трубки обдуваются воздухом) при низком давлении и, следовательно, при низкой температуре происходит испарение (кипение) фреона за счет тепла помещения, при этом из помещения отбирается количество тепла q_2 . Пары фреона отсасываются и сжимаются компрессором 2, при этом рабочему

телу (фреону) сообщается энергия, затрачиваемая компрессором I_k . Пары затем поступают в конденсатор (теплообменник, аналогичный испарителю), где фреон конденсируется при более высоком давлении, создаваемым компрессором, а следовательно, при более высокой температуре. При конденсации нужно отбирать тепло от рабочего тела, это производится внешним теплым воздухом (но он холоднее конденсирующегося фреона), поэтому внешний воздух отбирает от фреона количество тепла q_1 . Жидкий фреон затем поступает в дроссель 4 (это тонкая трубка или малое отверстие), давление резко снижается. В испаритель 1 фреон поступает с низким давлением, и цикл повторяется.

Описанная схема может выполнять две задачи: охлаждать или нагревать объект. Машины, предназначенные для отбора тепла от тел с низкой температурой, называются

холодильниками; устройства, передающие тепло телам с более высокой температурой, называются тепловыми насосами, т.е. название агрегата зависит от функции.

По II закону термодинамики тепло не может само собой переходить от холодного тела (охлаждённый воздух в помещении) к тепловому (наружный летний воздух). Для осуществления такого теплового потока требуется затрата энергии. В данном случае эта энергия представлена энергией, затраченной компрессором:

$$l_k = q_1 - q_2. \quad (1)$$

Следовательно, горячему телу с температурой T_1 передается больше тепла, чем взято у холодного тела с температурой T_2 : $q_1 = q_2 + l_k$. В этом заключается термодинамический смысл отопления описанным способом (отбирается тепло от холодного тела, добавляется энергия, приложенная к рабочему телу).

Обратный цикл Карно (теоретическое сочетание процессов в данной схеме) характеризуется отопительным коэффициентом ϕ :

$$\phi = \frac{q_1}{l_k} = \frac{q_1}{q_1 - q_2} = \frac{T_1}{T_1 - T_2}; \quad (2)$$

и холодильным коэффициентом ε :

$$\varepsilon = \frac{q_2}{l_k} = \frac{q_2}{q_1 - q_2} = \frac{T_2}{T_1 - T_2}; \quad (3)$$

которые связаны между собой так:

$$\phi = \frac{q_1}{l_k} = \frac{q_2 + l_k}{l_k} = \varepsilon + 1. \quad (4)$$

Чем меньше $\Delta T = T_1 - T_2$, тем выше эффективность работы (меньше затрачивается энергии на "прокачку" тепла), т.е. при отоплении желательно использовать на испарителе наиболее теплые источники (сбросная вода ТЭС, геотермальные воды и т.п.), а при охлаждении объектов - на конденсаторе нужно использовать наиболее холодные источники (не подвергать облучению солнцем, подальше от теплых тел, выбирать по возможности холодные места).

Обычно кондиционеры используются для понижения температуры в летнее время в помещении, зимой используется традиционная отопительная техника. При охлаждении воздуха в помещении он проходит через испаритель при помощи вентилятора а, наружный теплый воздух проходит через более горячий конденсатор при помощи вентилятора б.

Лабораторный кондиционер предназначен для передачи тепла из помещения наружу, когда в помещении прохладнее, чем на улице. Однако лабораторные занятия часто проходят при противоположном соотношении температур. Поэтому теплым термодинамическим источником может быть принят воздух у потолка помещения, как имитация теплого наружного воздуха, а холодным термодинамическим источником - воздух на уровне стола.

Исследование работы кондиционера

1. Кондиционер включается в следующей последовательности; - открываются жалюзи, включается вентиляция, режим вентиляции выдерживается в течение 5 минут, включается компрессор, устанавливается режим по заданию преподавателя, приступить к замерам экспериментальных данных после 15 минут работы компрессора. Заслонка все время должна быть закрыта. Отключение компрессора: выключить компрессор, провентилировать в течение 5 минут аппарат, отключить вентиляторы, закрыть жалюзи.

2. По температуре T_1 и T_2 (температура в помещении и всасываемый наружный воздух) вычисляется φ и ε по (3, 4).

3. По температуре воздуха до и после конденсатора, его расходу вычисляется q_1 :

$$q_1 = V \cdot C' \cdot \Delta T_k,$$

где V - расход воздуха, $\text{м}^3/\text{сек}$, $V = Wf$;

W - скорость, $W = 4 \text{ м/сек}$;

f - сечение для прохода воздуха, равное $0,2 \times 0,1 \text{ м}^2$;

C' - объемная теплоемкость воздуха: $C' = \rho \cdot C$;

ρ - плотность воздуха, кг/м^3 ;

C - массовая теплоемкость, равная $1005 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$;

ΔT_k - нагрев воздуха при прохождении его через конденсатор, $\Delta T_k = T_k - T_1$.

4. По (2) определяется мощность компрессора для идеального обратного цикла Карно, $I_k = q_1 / \varphi$.

5. По (3) определяется теоретическая максимальная хладопроизводительность, $q_2 = \varepsilon \cdot I_k$

Таблица опытных и расчетных данных.

Температура, К				Скорость потока, м/сек	Расход воздуха, $\text{м}^3/\text{сек}$	Параметры цикла Карно		Количество тепла, Вт		Мощность компрессора, Вт
T_1	T_2	T_k	T_u	W	V	φ	ε	q_1	q_2	I_k
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

Контрольные вопросы.

1. Основные элементы аппарата, их работа.
2. Рассказать порядок включения и отключения кондиционера.
3. Почему испаритель холодный, конденсатор горячий?
4. Где и как используются кондиционеры?
5. Как повысить эффективность работы кондиционера?

Литература [1], стр. 312; [3], стр. 274.

РАБОТА № 5

ИССЛЕДОВАНИЕ КРИВОЙ НАСЫЩЕНИЯ ВОДЯНОГО ПАРА

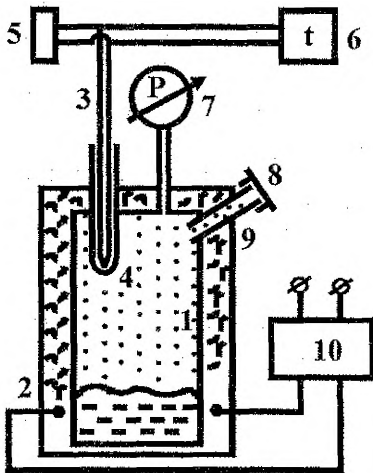
Цель работы: получить экспериментальную зависимость между давлением и температурой насыщенного пара для определения теплоты парообразования.

Водяной пар используется в паросиловых установках, системах парового отопления, в различных технологических процессах.

При нагревании воды ее температура повышается, пока не достигнет температуры кипения, зависящей от давления, при котором находится жидкость. Пар, образующийся в процессе кипения, находится в динамическом равновесии с жидкостью и имеет с ней

одинаковое давление P . Такой пар называют насыщенным, а соответствующая температура - температура насыщения t_n . Для каждого вещества можно построить кривую насыщения, т.е. зависимость $t_n = f(P)$. Характер такой зависимости приведен на стенде.

Описание опытной установки



Основной элемент установки - толстостенный цилиндрический сосуд 1 из хромоникелевой стали с днищем и крышкой, соединенными с цилиндром сваркой. На боковой поверхности сосуда по асбесту намотан электрический нагреватель из нихромовой проволоки 2. Питание к нагревателю подводится через электротрансформатор 10. В сосуд через патрубок 9, закрываемый стальной пробкой 8, заливается вода. Температура пароводяной смеси в цилиндре измеряется хромель-алюмелевыми термопарами 3, подключенными к измерительному прибору 5 и к контролируемому прибору 6. Горячие спаи термопар 3 помещены в стальной гильзе 4, вваренной в верхнюю крышку сосуда. Давление пароводяной смеси

в сосуде измеряется манометром 7, соединенным трубкой с внутренней полостью сосуда.

Проведение опыта

Необходимо провести замеры давления P и температуры t_n в 7-ми точках кривой насыщения, построить зависимость $P = f(T)$ и с помощью полученных опытных данных рассчитать теплоту парообразования в соответствующих 2-3 точках.

Измерения изменяющейся температуры и давления можно проводить в процессе нагревания или при охлаждении пароводяной смеси. Необходимо иметь в виду, что принимается абсолютное давление.

Манометр измеряет избыточное, по сравнению с атмосферным, давление (при атмосферном давлении стрелка пружинного манометра показывает $P_M = 0$). Шкала манометра проградуирована в кгс/см²:

$$1 \text{ кгс/см}^2 = 0,98 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2 \approx 1 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2, \text{ Па}$$

Абсолютное давление P_a связано с манометрическим P_M соотношением: $P_a = B + P_M$, барометрическое давление можно принять равным:

$$B = 1 \text{ кгс/см}^2 \approx 1 \cdot 10^5 \text{ Па}, (1 \text{ Бар})$$

К началу опыта первое равновесное состояние установлено. Дальнейшие измерения давления и температуры следует выполнять через каждые (0,03 - 0,05) МПа. Полученные значения сводятся в таблицу:

Таблица опытных и расчетных данных.

№ п/п	Давление, P			Количество делений, n	Температура насыщения, t_n	
	атм	МПа	Па		°С	К
1	2	3	4	5	6	7

Обработка результатов измерений

По полученным экспериментальным данным построить кривую насыщения водяного пара в $P - t$ в координатах выбранного масштаба.

По уравнению Клапейрона определить теплоту парообразования для заданной точки кривой:

$$r = T \cdot dP/dT \cdot (v'' - v') \cdot 10^3, \text{ кДж/кг};$$

где T - абсолютная температура; v'' и v' - удельный объем сухого насыщенного пара и воды соответственно, $\text{м}^3/\text{кг}$; P - давление, Па. Учитывая, $v'' \gg v'$, последней величиной можно пренебречь.

$$r = 10^3 \cdot T \cdot dP/dT \cdot v''.$$

Значение v'' при соответствующей температуре t берется по графику на стенде. Частную производную dP/dT можно приближенно заменить отношением конечных разностей $\Delta P/\Delta T$. Для этого по заданной температуре заменяют участок кривой $P(t)$ гипотенузой треугольника, катеты которого равны, соответственно, ΔP и ΔT . Полученное значение r сравнить с табличным.

Контрольные вопросы.

1. Какой пар называется влажным насыщенным?
2. Каким образом связаны между собой абсолютное и манометрическое давление?
3. Что такое теплота парообразования, как она используется?
4. Где применяется водяной пар?

Литература [3], стр. 112.

РАБОТА № 6

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВЛАЖНОГО ВОЗДУХА

Цель работы: закрепить знания по термодинамике влажного воздуха, определить различными методами основные параметры влажного воздуха.

Влажным воздухом называется механическая смесь сухого воздуха с водяным паром. Водяной пар во влажном воздухе наиболее часто находится в перегретом состоянии. Поэтому влажный воздух можно считать с достаточной для практических расчетов точностью идеальным газом. Тогда по закону Дальтона общее давление влажного воздуха равно сумме парциальных давлений сухого воздуха и водяного пара: $P = P_a + P_n$. По своему физическому смыслу парциальное давление определяется концентрацией молекул во влажном воздухе. Увеличение ограничено пределом, соответствующим максимально возможной концентрации молекул водяного пара при данной температуре. Этот предел называется максимальным парциальным давлением водяного пара, или давлением насыщения, и обозначается P_n . Важнейшими характеристиками (параметрами) влажного воздуха являются: относительная влажность ϕ , влагосодержание d , теплосодержание J , точка росы.

Относительная влажность - это отношение количества влаги, содержащейся в 1 м^3 воздуха к максимально возможному ее количеству, которое может содержаться в том же 1 м^3 воздуха, при тех же P и t . Относительная влажность представляет собой отношение парциального давления водяного пара во влажном воздухе к парциальному давлению водяного пара при той же температуре и полном насыщении его влагой:

$$\varphi = P_n / P_n.$$

Наиболее распространенным методом определения влажности и других параметров влажного воздуха является психрометрический, соответствующий прибор называется психрометром.

Психрометр состоит из двух термометров. Термобаллон одного из них обернут матерчатым чехлом, который за счет капиллярных сил подсасывает воду из расположенного под ним сосуда. Этот термометр называется мокрым, по которому снимаются показания t_m . Другой термометр измеряет температуру воздуха в помещении и называется сухим, его показания t_c . Чем суше воздух при данной температуре, тем интенсивнее испаряется влага с поверхности "мокрого" термометра, и больше психрометрическая разность:

$$\Delta t = t_c - t_m.$$

Если воздух насыщен парами воды ($\varphi = 100 \%$), то "сухой" и "мокрый" термометры зафиксируют равные температуры, $\Delta t = 0$.

По показаниям "сухого" и "мокрого" термометров относительную влажность воздуха можно определить следующими способами:

- 1) по психрометрической таблице,
- 2) по таблице максимальных парциальных давлений,
- 3) по $t - d$ диаграмме,
- 4) по графику $\varphi = f(t_c, t_m, \Delta t)$.

Определение φ по таблице максимальных парциальных давлений водяного пара производится в следующей последовательности: по замеренной t_c определяют по таблице P_n , по t_m - там же P_m , и далее по формулам:

$$P_n = P_m - 0,504 \frac{B}{740} (t_c - t_m),$$

$$\varphi = P_n / P_n.$$

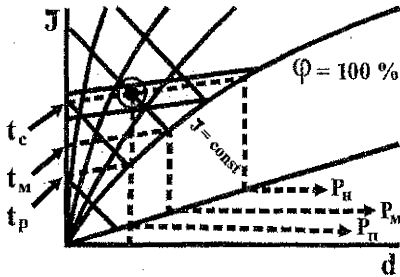
Определение φ по $t - d$ диаграмме производится графическим путем. Для этого проводим изотерму, соответствующую температуре "мокрого" термометра $t = \text{const}$ до кривой полного насыщения $\varphi = 100 \%$. Искомая точка **A**, определяющая параметры влажного воздуха, находится на пересечении изотермы "сухого" термометра с линией, носящей название линии постоянного теплосодержания I .

Влагосодержанием влажного воздуха d называют количество водяных паров в 1 кг сухого воздуха:

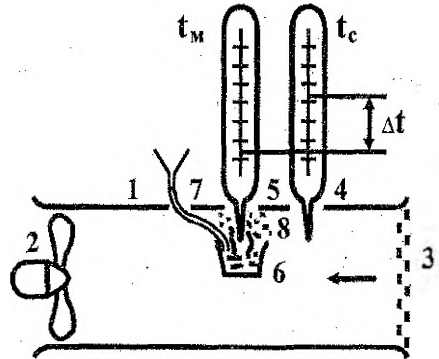
$$d = 622 \frac{P_n}{B - P_n}, \text{ г/кг с.в. } (\% \text{ о}).$$

Точка росы t_p - это температура, до которой следует охладить ненасыщенный воздух, чтобы он стал насыщенным (из точки **A** вертикально вниз до $\varphi = 100 \%$).

Экспериментальная установка



Экспериментальная установка представляет собой аэродинамическую трубу 1, через которую продувается воздух при помощи вентилятора 2. Скорость воздуха в трубе изменяется шибером 3. В трубе установлен психрометр, состоящий из „сухого“ 4 и „мокрого“ 5 термометров, сосуда 6 с водой и подающей трубки 7. В сосуд 6 вводится батистовый фитиль 8, подсаживающий воду к поверхности шарика „мокрого“ термометра.



Согласно поставленной задаче необходимо определить относительную влажность φ и остальные параметры – влаго-содержание d , точку росы t_p , тепло-содержание J , парциальное давление P_n , давление насыщения P_n . Данные, полученные разными методами, следует сопоставить и проанализировать.

Таблица параметров влажного воздуха

Метод определения данных	φ	t_p	J	P_n	P_n	d
	%	°C	кДж/кг	кПа	кПа	%
1. Расчет	2	3	4	5	6	7
2. Таблицы						
3. Графики						
4. J-d диаграмма						

Контрольные вопросы.

1. Пояснить механизм тепло- и массообмена между воздухом и водой, на котором основан психрометрический способ определения параметров влажного воздуха.
2. Назвать основные параметры влажного воздуха.
3. Какому состоянию влажного воздуха соответствует максимальное парциальное давление пара?
4. Объяснить J-d диаграмму.

Литература [1], стр. 31-33.

РАБОТА № 7

ИЗУЧЕНИЕ СИСТЕМЫ ВОДЯНОГО ОТОПЛЕНИЯ

Цель работы: опытное определение естественного давления (движущего напора) и скорости циркуляции теплоносителя, построение гидродинамической характеристики системы отопления здания.

Основные положения теории

Если в замкнутом водяном контуре имеются участки с подводом и отводом тепла, то в нем возникает естественное давление, обусловленное разностью плотностей холодной и горячей жидкости.

$$\Delta P_e = h g (\rho_0 - \rho_2), \text{ Па (Н/м}^2\text{);}$$

где h - разность уровней с разными температурами,

g - ускорение свободного падения ($g = 9,8 \text{ м/с}^2$),

ρ_0 - плотность охлажденной воды,

ρ_2 - плотность горячей воды.

Естественное давление вызывает циркуляцию воды в контуре. При движении воды в контуре возникает гидравлическое сопротивление, которое складывается из сопротивления трения и местных сопротивлений:

$$\Delta P_e = R = \Delta P_T + \Delta P_m,$$

$$R = \sum \left(\frac{\lambda}{d} \frac{W^2}{2} \rho \cdot l \right) + \sum \left(\zeta \frac{W^2}{2} \rho \right),$$

где λ - коэффициент гидравлического трения;

d - диаметр трубопровода, м;

l - длина участка, м;

ζ - коэффициент местного сопротивления;

ρ - скорость течения воды, кг/м³;

W - скорость течения воды, м/с.

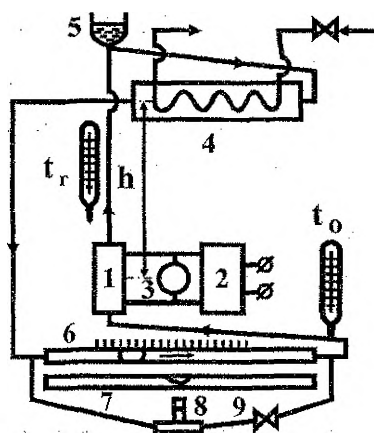
Это сопротивление преодолевается естественным давлением (движущим напором). Установившийся режим наступает при $\Delta P_e = R$. Таким образом, каждому значению скорости циркуляции соответствует определенное значение естественного давления, т.е. для данного контура естественная циркуляция обусловлена степенью нагрева и охлаждения его участка и высотой контура.

Зависимость между действующим естественным давлением в контуре и расходом жидкости в нем называется гидродинамической характеристикой.

Определение гидродинамической характеристики необходимо для теплого и гидравлического расчета систем водяного отопления. Например, зная гидродинамическую характеристику данной системы, можно вычислить расход воды на отопление и, наоборот, при заданных теплопотерях выбрать и расположить нагревательные приборы таким образом, чтобы при установленных котлах или бойлерах обеспечить необходимый подвод тепла в помещения.

Экспериментальная установка

Экспериментальная установка представляет собой модель системы водяного отопления. Моделью котла служит электрический нагреватель 1, мощность которого регулируется лабораторным трансформатором 2 и контролируется вольтметром 3. Моделью нагревательного прибора (радиатора) является стеклянный водяной теплообменник 4, который охлаждается проточной водой.



Температуры горячей котловой и охлажденной в радиаторе воды измеряются стеклянными термометрами T_r и T_o , установленными в расширительном сосуде 5 и перед нагревателем 1. Для измерения скорости циркуляции используется пузырьковый измеритель скорости жидкости. Он состоит из измерительного участка 6, тройника 8, зажима 9 и соединительных трубок. Измерительный участок включен в циркуляционный контур. Пузырек вводится в измерительный участок опусканием тройника 8. Ватерпас 7 служит для установки измерительного участка 6 в горизонтальное положение. Расход циркулирующей воды:

$$G = W \cdot f \cdot \rho_{\text{охл}} = f \cdot \rho_{\text{охл}} \cdot l / \tau, \text{ кг/с};$$

где f - поперечное сечение измерительного участка ($f = 15,9 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$);

$\rho_{\text{охл}}$ - определяется по графику $\rho = f(t)$;

τ - время движения пузырька, сек, на расстоянии l , м, по шкале 6 (l выбирается, например 0,2 м).

Порядок проведения опыта

Для построения гидродинамической характеристики $G = f(\Delta P_e)$ необходимо несколько точек, т.е. нужно иметь несколько режимов работы контура по нагреву и охлаждению воды. Режим устанавливается мощностью электрического нагревателя (при помощи ручки трансформатора) и расходом воды (при помощи вентиля проточной воды). Замеры следует производить по достижению постоянства температур в каждой измеряемой точке. Затем изменяется положение ручки трансформатора или вентиля, и после прогрева лабораторного стенда снимается следующий режим.

$$G = f(\Delta P_e).$$

Таблица опытных и расчетных данных

№ опыта	t_r °C	t_o °C	ρ_r кг/м ³	ρ_o кг/м ³	ΔP_e Па	τ с	W м/с	G кг/с
1	2	3	4	5	6	7	8	9

Контрольные вопросы.

1. За счет чего возникает естественное давление в циркуляционном контуре?
2. На что расходуется это давление?
3. От чего зависит это давление?
4. Влияет ли расширительный сосуд на циркуляцию?
5. Как изменяется циркуляция при подключении параллельных контуров?
6. Почему гидродинамическая характеристика имеет параболический вид?

Литература [1], § 23, 26, 27.

РАБОТА № 8

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ НАГРЕВАТЕЛЬНОГО ПРИБОРА

Цель работы: ознакомление с нагревательными приборами, изучение методики опытного определения коэффициента теплопередачи нагревательного прибора.

В результате работы должны быть усвоены: физическая сущность процесса теплопередачи; уравнения, описывающие этот процесс; связь между коэффициентом теплопередачи и составляющими термическими сопротивлениями.

Теория вопроса

Теплопередачей называют процесс сложного теплообмена между двумя средами (жидкость или газ), разделенными твердой стенкой. Тепло передается от жидкости к стенке путем конвективного теплообмена:

$$q_1 = \alpha_1 (t_{ж} - t_{ст1}), \text{ Вт};$$

через стенку - путем теплопроводности:

$$q_2 = \frac{\lambda}{\delta} (t_{ст1} - t_{ст2}), \text{ Вт};$$

и от противоположной поверхности стенки к воздуху, - конвективным теплообменом:

$$q_3 = \alpha_2 (t_{ст2} - t_r), \text{ Вт}.$$

Так как температура поверхности нагревательного прибора (радиатора) невелика, то лучистой составляющей пренебрегают. При стационарных условиях

$$q_1 = q_2 = q_3 = q,$$

$$q = \alpha_1 (t_{ж} - t_{ст1}) = \frac{\lambda}{\delta} (t_{ст1} - t_{ст2}) = \alpha_2 (t_{ст2} - t_r),$$

где α_1 , α_2 - коэффициенты теплоотдачи от жидкости к стенке и от противоположной поверхности стенки к газу соответственно, Вт/м²·К;

λ - коэффициент теплопроводности материала стенки, Вт/м·К;

δ - толщина стенки, м.

На основании этих уравнений можно записать уравнение теплопередачи:

$$q = K(t_{ж} - t_r), \text{ Вт};$$

где K - коэффициент теплопередачи, характеризующий теплообмен. Он численно равен количеству тепла, перенесенному через единицу поверхности в единицу времени при единичном перепаде температур между жидкостью и газом:

$$K = 1 / \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} \right).$$

Отношения $R_1 = \frac{1}{\alpha_1}$, $R_2 = \frac{\delta}{\lambda}$, $R_3 = \frac{1}{\alpha_2}$ называют термическими сопротивлениями теплоотдачи и теплопроводности. Тихим образом

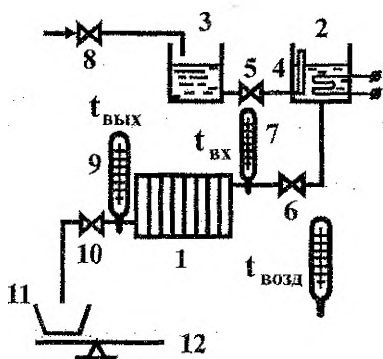
$$K = \frac{1}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{1}{R_{\text{общ}}}$$

где $R_{\text{общ}}$ - общее термическое сопротивление теплопередаче.

Нагревательные приборы систем централизованного отопления предназначены для передачи тепла от теплоносителей (вода или пар) воздуху отапливаемых помещений через стенки нагревательного прибора.

Радиаторы, по сравнению с другими приборами, получили наибольшее распространение

благодаря своей компактности, хорошим теплотехническим и гигиеническим свойствам. При установке нагревательных приборов важно учитывать расход металла, так как масса металла нагревательных приборов намного превышает массу теплопроводов, составляя 60-80 % от общей массы системы отопления. Нагревательные приборы не рекомендуется закрывать или загромождать мебелью, так как это ухудшает их теплоотдачу. Для радиаторов одной и той же формы на величину коэффициента теплопередачи оказывает высота прибора. Чем выше прибор, тем меньше коэффициент теплопередачи.



Описание экспериментальной установки и методики проведения опытов

Опытная установка включает в себя радиатор 1, бак с горячей водой 2, подпиточный бак с холодной водой 3, соединенные друг с другом трубопроводами с кранами 5, 6, 8. Температура горячей воды на входе в радиатор и на выходе из него измеряется термометрами 7, 9. Расход воды через радиатор определяется весовым способом. При выполнении работы должны быть получены коэффициенты теплопередачи для открытого радиатора. В ходе опытов измеряются температуры воды на входе в радиатор и на выходе из него, расход воды, стекающей в мерный бачок 11, установленный на весах 12, и температура комнатного воздуха. Перед началом опыта прогревают радиатор до рабочего режима, пропуская горячую воду из бака 2 до тех пор, пока разность температур воды на входе в радиатор и на выходе из него составит 15-20 °С. Затем при помощи крана 10

устанавливают рабочий расход воды $G = 20 \text{ кг/ч}$ ($\approx 0,005 \text{ кг/с}$).

Коэффициент теплопередачи радиатора определяется из соотношения:

$$K = q / F \cdot \Delta t, \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К};$$

где q – тепловой поток от радиатора к комнатному воздуху, Вт;

F - поверхность радиатора, м^2 ;

$$F = f \cdot n = 0,254 \cdot 7 = 1,778 \text{ м}^2,$$

где f - поверхность секции, м^2 ;

n - число секций радиатора, шт;

Δt - расчетная разность температур между водой и воздухом помещения

$$\Delta t = t_{\text{в}} - t_{\text{возд}}; t_{\text{в}} = 0,5 (t_{\text{вх}} + t_{\text{вых}});$$

$t_{\text{в}}$ - средняя температура воды в радиаторе, $^{\circ}\text{C}$;

$t_{\text{возд}}$ - температура воздуха в помещении, $^{\circ}\text{C}$;

Тепловой поток q , переданный радиатором, определяется по формуле:

$$q = G \cdot c_{\text{в}} (t_{\text{вх}} - t_{\text{вых}}), \text{ Вт};$$

$c_{\text{в}}$ - теплоемкость воды ($c_{\text{в}} = 4190 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}$);

G - расход воды, кг/с .

Таблица опытных и расчетных данных.

№ опыта	Масса вытекшей воды, M кг	Время опыта, t с	$G = M/t$ кг/с	Температуры, $^{\circ}\text{C}$			Тепловая мощность, Q Вт	K Вт/($\text{м}^2\cdot\text{К}$)
				на входе	на выходе	воздуха		
1	2	3	4	5	6	7	8	9

Контрольные вопросы.

1. Каким способом передается радиатором тепло от горячей воды к комнатному воздуху?

2. Как изменится коэффициент теплопередачи, если:

А. Радиатор закрыть кожухом?

Б. Радиатор обдувать воздухом?

В. Радиатор окрасить в темный цвет?

3. С какой целью производят оребрение поверхности радиатора?

Литература: [1], стр. 106; [4], стр. 180.

РАБОТА № 9

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТИЧЕСКОГО ДИАМЕТРА ТЕПЛОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ ТРУБОПРОВОДА

Цель работы: выявление особенностей тепловых потоков в цилиндрических элементах теплоизоляции.

Теория вопроса

Цилиндрической называют стенку, толщина которой соизмерима с ее диаметром. В качестве такой стенки можно принять слой теплоизоляции, нанесенный на поверхность трубы. Такие случаи имеют место при перекачке горячих теплоносителей - воды, водяного пара, в трубопроводах при воздушной или канальной прокладке. Слой теплоизоляции обладает термическим сопротивлением, за счет которого в радиальном направлении возникает падение температуры.

Удельные тепловые потери, отнесенные к одному погонному метру трубопровода определяются соотношением:

$$q_e = \pi K_e (t_e - t_n) = \pi \cdot (t_e - t_n) / R_e, \quad (1)$$

где K_e - линейный коэффициент теплопередачи, Вт/(м·К);

R_e - общее линейное термическое сопротивление теплопередаче, м·К/Вт;

t_e , t_n - температуры среды внутри трубы, и среды, омывающей наружную поверхность теплоизоляции.

Общее термическое сопротивление теплопередаче R_l складывается из следующих термических сопротивлений: сопротивления теплоотдачи от внутренней жидкости к внутренней поверхности трубы R_e , сопротивления теплопроводности стенки трубы R_c и слоя теплоизоляции R_u , сопротивления теплопередачи от наружной поверхности теплоизоляции в окружающую среду R_n ; $R_l = R_e + R_c + R_u + R_n$. Если изменяется внешний диаметр теплоизоляции, то его влияние на q_e :

$$q_e = \pi \left(\frac{1}{2\lambda} \cdot \ln \frac{d_n}{d_e} + \frac{1}{\alpha \cdot d_n} \right)^{-1} (t_e - t_n), \quad (2)$$

где λ - коэффициент теплопроводности изоляции, Вт/м·К;

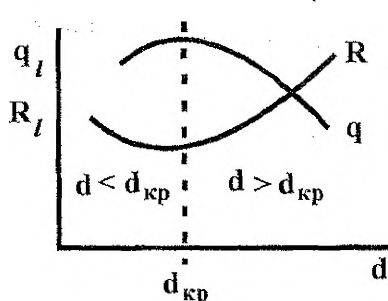
d_n , d_e - наружный и внутренний диаметры теплоизоляции соответственно, м;

α - коэффициент теплоотдачи с поверхности теплоизоляции в окружающую среду, Вт/м²·К;

t_e , t_n - температура внутренней поверхности теплоизоляции и окружающей среды соответственно, °С.

Термическое сопротивление слоя теплоизоляции возрастает с увеличением d_n , термическое сопротивление теплоотдаче из-за роста внешней поверхности при этом уменьшается. Характер изменения полного термического сопротивления определяется

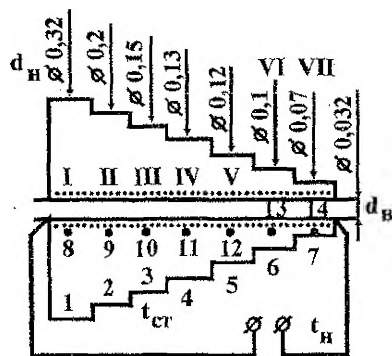
изменением слагающих сопротивлений. Если функцию $R_l = f(d)$ проанализировать на экстремум, т.е. вычислить первую производную от $(R_u + R_n)$ и приравнять нулю, получим $d = 2\lambda / \alpha$ ($d_{кр}$). Это означает, что полное термическое сопротивление в том случае будет минимальным, а тепловой поток (т.е. тепловые потери трубопровода) - максимальны.



Значение внешнего диаметра теплоизоляции, соответствующего минимальному сопротивлению теплопередачи, называется критическим диаметром и обозначается $d_{кр}$. При $d < d_{кр}$ с увеличением d полное термическое сопротивление снижается, т.е. увеличение наружной поверхности оказывает на термическое сопротивление большее влияние, чем увеличение толщины слоя теплоизоляции. Тепловые потери q_l при этом

возрастают. При $d > d_{кр}$, с увеличением d термическое сопротивление возрастает, что указывает на преобладающее влияние толщины стенки. Тепловые потери q_l при этом уменьшаются.

Экспериментальная установка



На керамическую трубку с наружным диаметром 32 мм намотан нихромовый провод, поверх которого нанесена теплоизоляция в виде дисков, имеющих семь различных диаметров. В сечениях с I по VII в дисках размещено 14 термомпар, при помощи которых измеряют температуры внешних поверхностей соответствующих дисков. Остальные семь термомпар расположены на внутренней поверхности теплоизоляции.

Э.д.с. термомпар измеряется с помощью зеркального гальванометра. График зависимости $E = f(t)$ приведен на стенде.

Порядок проведения опыта

Коэффициент теплопроводности теплоизоляции принимается по средней температуре в соответствующем диске. График зависимости $\lambda = f(t_{cp})$ приведен на стенде. Коэффициент теплоотдачи α для соответствующего диска определяется по эмпирической формуле:

$$\alpha = 8,4 + 0,06(t_{cr} - t_n), \text{ Вт/м}^2\text{K}; \quad (3)$$

где t_{cm} - температура наружной поверхности диска, °С (1...7),

t_H - температура наружного воздуха.

Таким образом, для построения графика зависимости $q_l = f(d_H)$ по (2) необходимо измерить температуры внутренней и наружной поверхностей теплоизоляции для семи дисков. Номера соответствующих термометров указаны на стенде. Результаты измерений и расчетов заносятся в таблицу.

Таблица опытных и расчетных данных.

Величины	Сечения						
	1	2	3	4	5	6	7
1. t_{cm} (нар. поверхн.)							
2. t_e (внутри трубы)							
3. $t_{cp} = 0,5(t_{cm} + t_e)$							
4. t_H (воздух)							
5. λ (по t_{cp})							
6. α (по (3))							
7. q_l (по (2))							

По результатам расчетов строится зависимость $q_l = f(d_H)$, по которой определяется $d_{кр}$ и сопоставляется с расчетным $d = 2\lambda/\alpha$.

Контрольные вопросы.

1. Какие физические условия определяют теплотери изолированного трубопровода?

2. Какой диаметр теплоизоляции называется критическим?

Литература [3], стр. 184.

ЛИТЕРАТУРА

1. К.В. Тихомиров "Общая теплотехника, теплогазоснабжение и вентиляция", Стройиздат, 1981г.

2. В.И. Богословский "Отопление и вентиляция", Стройиздат, 1980г.

3. Теплотехника. Учебник для вузов под ред. А.П. Баскакова. Энергоиздат, 1982г.

4. М.А. Михеев, И.М. Михеева. Основы теплопередачи. Энергия, 1973г.

УЧЕБНОЕ ИЗДАНИЕ

Составители: Северянин Виталий Степанович
Горбачева Мария Григорьевна
Черников Игорь Анатольевич

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению лабораторных работ по дисциплине
«Инженерные сети и оборудование»
для студентов
специальностей 70 02 01, 70 04 03, 37 01 06, 53 01 01
дневной и заочной форм обучения

Ответственный за выпуск: Черников И.А.
Редактор: Строкач Т. В.
Компьютерная верстка: Боровикова Е.А.
Корректор: Никитчик Е.В.

Подписано в печать 22.05.2005 г. Формат 60×84 1/16. Усл. печ. л. 1,63. Уч.-изд. л. 1,75.
Заказ № 508. Тираж 100 экз. Отпечатано на ризографе учреждения образования
«Брестский государственный технический университет».
224017, г. Брест, ул. Московская, 267