

Федеральное агентство по образованию  
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования  
«Ивановская государственная текстильная академия»

Кафедра теплотехники

## МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению лабораторных работ по дисциплине  
«Теплотехника»

ИВАНОВО 2005

Настоящие методические указания предназначены для студентов, которые изучают дисциплину "Теплотехника" и проходят лабораторный практикум по указанной дисциплине.

Основная цель лабораторного практикума - закрепить теоретические положения курса и познакомить с методикой проведения несложных теплотехнических экспериментов.

В настоящих указаниях приводятся краткая теория, описание и руководство к выполнению шести лабораторных работ. При подготовке к собеседованию по выполненной лабораторной работе с преподавателем, ведущим лабораторный практикум, нужно изучить устройство экспериментальной установки, методику определения искомых величин или зависимостей и освоить основы теории к работе, используя рекомендуемую литературу по данной дисциплине.

Составители: канд. техн. наук, доц. Л.Н. Девочкина,  
канд. техн. наук, доц. Е.Е. Корочкина

Научный редактор докт.техн. наук, проф. Е.Н. Калинин

## Лабораторная работа №1

### Определение теплоемкости воздуха при постоянном давлении

#### 1. Цель работы

- 1.1. Экспериментально определить величину средней массовой теплоемкости воздуха при постоянном давлении  $C_{pm}$ , кДж/(кг\*К) в пределах температур от  $t_1$  до  $t_2$ .
- 1.2. Вычислить величины  $C_{vm}$ ,  $C'_{pm}$ ,  $C'_{vm}$ ,  $C_{p\mu}$ ,  $C_{v\mu}$ ,  $K$ .

$$K = \frac{C_p}{C_v} = \frac{C'_p}{C'_v} = \frac{C_{p\mu}}{C_{v\mu}}$$

#### 2. Теоретические основы

Теплоемкостью называют количество теплоты, необходимое для нагревания вещества на один Кельвин.

Теплоемкость, отнесенную к единице количества вещества, называют удельной. Различают удельную массовую  $C$  кДж/(кг\*К), удельную мольную  $\mu$  кДж(моль\*К), удельную объемную  $C'$  кДж/(м<sup>3</sup>\*К) теплоемкости от выбранной количественной единицы. Объемную теплоемкость принято относить к массе газа, заключенной в 1 м<sup>3</sup> при нормальных физических условиях ( $p = 760$  мм.рт.ст.,  $t = 0$  °С).

Между указанными теплоемкостями существует следующая связь:

$$C = C'v_0 = \frac{C_u}{\mu}$$

В зависимости от характера процесса нагревания (охлаждения) вещества теплоемкости бывают различными. Для практических целей важны теплоемкости при постоянном давлении и постоянном объеме. По уравнению Майера  $C_p = C_v + R$  изобарная теплоемкость больше изохорной на величину газовой постоянной, численно равной удельной работе, совершаемой 1 кг вещества при изобарном нагревании на один Кельвин.

Теплоемкость зависит от температуры. По этому признаку различают среднюю и истинную теплоемкость. Если  $Q$  - количество теплоты, сообщаемое единице количества вещества при изменении температуры от  $t_1$  до  $t_2$ , то величина

$$C_m = \frac{q}{t_2 - t_1}$$

представляет среднюю теплоемкость в пределах температур от  $t_1$  до  $t_2$ . Предел этого отношения, когда разность температур стремится к нулю, называют истинной теплоемкостью  $C = \delta q / \alpha T$ .

При выполнении лабораторной работы непосредственно из опыта определяются средняя удельная массовая теплоемкость при постоянном давлении в пределах температур от  $t_1$  до  $t_2$ , а затем  $C_{vm}$ ,  $C'_{pm}$ ,  $C'_{vm}$ ,  $C_{p\mu}$ ,  $C_{v\mu}$  и коэффициент Пуассона  $K$ .

#### 3. Экспериментальная установка

Опытное определение  $C_{pm}$  основано на применении проточного калориметра (1) - рис. 1. При работе установки воздух, прогоняемый через калориметр вентилятором (2), нагревается от температуры  $t_1$  до температуры  $t_2$  за счет теплоты, поступающей к нему от спирали электронагревателя (3), проходит дроссельную диафрагму (4) и уходит в атмосферу.

В первое время после включения электронагревателя теплота расходуется не только на нагревание воздуха, но и на нагревание самого калориметра. Поэтому в расчетную формулу для определения теплоемкости необходимо подставлять значения величин, снятых при установившемся (стационарном) режиме.

Признаком установившегося режима является неизменность температуры воздуха на выходе из калориметра, фиксируемой двумя-тремя последовательно проведенными замерами, при постоянной температуре воздуха на входе в установку.

Уравнение теплового баланса для установившегося режима имеет вид:

$$Q_{эл.н.} = Q + Q_{п.} или$$
$$IU = MC_{рв} (t_2 - t_1) + Q_{п.}$$

где  $Q_{эл.н.}$ , Вт - тепловой поток, выделяемый электронагревателем;

$Q$ , Вт - тепловой поток, идущий на нагревание воздуха;

$Q_{п.}$ , Вт - тепловые потери в окружающую среду через оболочку калориметра.

Для сведения потерь до минимума стенки трубчатого калориметра выполнены двойными, а из образованного ими кольцевого пространства удален воздух, что снижает потери тепла за счет теплопроводности и конвекции. Кроме того, наружная поверхность трубы калориметра - зеркальная, благодаря чему снижаются потери тепла за счет радиации. Поэтому тепловые потери в окружающую среду, вследствие их незначительности, при установившемся режиме можно не учитывать и считать, что тепловой поток, выделяемый нагревателем, полностью идет на нагревание воздуха.

Для определения расхода воздуха в данной работе используется дроссельный метод. Сущность его состоит в том, что на пути потока воздуха устанавливается дроссельная диафрагма, при преодолении сопротивления которой снижается давление потока воздуха соответственно скорости его движения. Величину перепада давлений измеряют тягонапоромером (5) и подставляют в формулу для определения скорости движения воздуха в сечении диафрагмы. Зная скорость движения воздуха и сечение диафрагмы, можно определить его расход.

Мощность электрического нагревателя, расходуемая на нагрев воздуха, определяется по приборам (6, 7) и регулируется реостатом (8). Температура воздуха фиксируется термометрами (9).

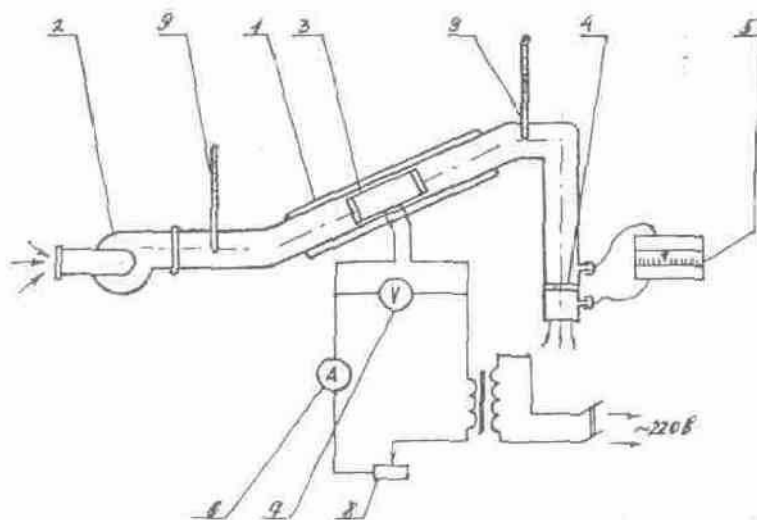


Рис. 3

#### 4. Порядок выполнения опыта

- 4.1. Необходимо убедиться, что измерительные приборы находятся в исправном состоянии и готовы к работе.
- 4.2. Разобраться в шкалах приборов и определить цену деления шкал.
- 4.3. Включить в электросеть двигатель вентилятора.
- 4.4. Включить нагреватель. Установить силу тока, заданную преподавателем. В течение опыта силу тока поддерживать постоянной.
- 4.5. Через каждые пять-десять минут снимать показания всех приборов и заносить в журнал наблюдений (табл. 1).

Таблица 1

№ п.п.	Время замера, час, мин.	J	U	t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	Δp	B	Примечание
		A	B	°C	°C	Па	мм.рт. ст.	
1	2	3	4	5	6	7	8	9

4.6. После наступления установившегося режима поставить в известность преподавателя о завершении опыта и, получив его разрешение, выключить установку. (Сначала выключить электронагреватель, а через две-три минуты выключить вентилятор.)

4.7. По данным установившегося режима выполнить нужные вычисления.

## 5. Обработка экспериментальных данных

5.1. Определяем плотность воздуха перед **диафрагмой**, пользуясь универсальным уравнением Клапейрона-Менделеева

$$\rho = \frac{P}{RT},$$

где  $P$ , Па - давление воздуха (в нашем случае его можно принять равным барометрическому):

$$P = \frac{B}{750} 10^3, \text{ Па};$$

$R = R_{\mu} / \mu = 8314,41 / 28,93 = 287,4 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}$  - газовая постоянная воздуха;

$\mu = 28,93$  - молекулярная масса воздуха;

$T$  - абсолютная температура воздуха в сечении диафрагмы;

$T = t_2 + 273,15 \text{ К}$ .

5.2. Скорость воздуха в диафрагме

$$w = \psi \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}, \text{ м/с},$$

где  $\psi$  - коэффициент расхода диафрагмы, который для диафрагмы круглого сечения ориентировочно может быть принят 0,97;

$\Delta p$ , Па - перепад давления воздуха на диафрагме.

5.3. Площадь живого сечения диафрагмы

$$f = \frac{\pi d^2}{4}, \text{ м}^2,$$

где  $d$ , м - диаметр диафрагмы.

5.4. Массовый расход воздуха через калориметр

$$M = f \cdot w \cdot \rho, \text{ кг/с}.$$

5.5. Средняя массовая изобарная теплоемкость в пределах изменения температур от  $t_1$  до  $t_2$  подсчитывается по формуле

$$c_{pm} = \frac{Q}{M(t_2 - t_1)}, \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)},$$

где  $Q$  - тепловой поток, идущий на нагревание воздуха в калориметре, согласно уравнению теплового баланса равен тепловому потоку нагревателя

$$Q = Q_{\text{наг}} = JU, \text{ Вт},$$

5.6. По приведенным ниже соотношениям вычислить значения объемной изобарной и мольной изобарной теплоемкостей

$$C_{pm}^* = C_{pm} \cdot \rho, \text{ Дж/м}^3 \cdot \text{К}; \quad C_{p\mu} = C_{pm} \mu, \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)},$$

где  $\mu = 28,93$  - молекулярная масса воздуха.

### 5.7. Вычислить значения изохорных теплоемкостей

$$C_{vm} = C_{pm} - R, \text{ (Дж/кг} \cdot \text{К)}; \quad C_{vm}^* = C_{pm}^* - pR, \text{ Дж/(м}^3 \cdot \text{К)};$$

$$C_{v\mu} = C_{p\mu} - R_{\mu}, \text{ (Дж/моль} \cdot \text{К)};$$

Литература: [1, с. 62-73; 2, с. 11-19].

## Контрольные вопросы к лабораторной работе №1

1. Что называется удельной теплоемкостью вещества? Размерности удельной теплоемкости.
2. Виды удельных теплоемкостей, связь между ними.
3. Формулировка и запись в раскрытом виде для установившегося режима работы лабораторной установки.
4. Уравнение теплового баланса в раскрытом виде для установившегося режима работы лабораторной установки.
5. Что такое установившийся режим? Его признак.
6. Каким образом в работе определяется расход воздуха?
7. Аналитическое и графическое определение теплоты и механической работы.

## Лабораторная работа №2

Определение зависимости между давлением и температурой насыщения водяных паров

### 1. Цель работы

- 1.1. Определить зависимость между давлением и температурой насыщения водяного пара.
- 1.2. Сравнить опытные данные с данными термодинамических таблиц водяного пара
- 1.3. Построить график  $p = f(t_n)$ .

### 2. Теоретические основы

Опытным путем установлено, что каждому давлению соответствует определенная температура фазового равновесия жидкости и пара, то есть температура кипения или конденсации в зависимости от того, подводится тепло или отводится. Эта температура называется температурой насыщения  $t_n$ . С повышением давления температура фазового равновесия жидкость-пар (газ)» возрастает.



В общем виде связь между температурой насыщения и давлением выражается уравнением  $p = f(t_n)$ , которое действительно для области фазового равновесия, где давление и температура взаимно определяют друг друга. Если упомянутую зависимость представить в  $p, t$ -диаграмме (рис. 2), то получится так называемая кривая насыщения  $p = f(t_n)$ , которая име-

ет для каждого вещества индивидуальный характер. Чем более легкокипящим является вещество, тем выше лежит эта кривая. Вправо от кривой фазового равновесия расположена область пара, влево - область жидкости. Кривая фазового равновесия жидкости и пара (насыщения) имеет конечную протяженность и заканчивается в некоторой точке К, соответствующей вполне определенным для данного вещества значениям температуры и давления. При давлениях выше давления в точке К нельзя наблюдать фазового перехода «жидкость-пар». Эта конечная точка кривой фазового равновесия «жидкость-пар» получила название критической точки, а соответствующие ей значения параметров — критических параметров (для  $H_2O - p_{кр} = 22,12$  Мпа,  $t_{кр} = 374^\circ\text{C}$ )

Отсутствие принципиального различия между жидкостью и паром (газом) в критической точке и сверхкритической области обусловлено одинаковым характером взаимодействия молекул в жидкостях и газах, вследствие чего жидкость и газ можно рассматривать как две изотропные фазы вещества, различающиеся лишь количественно

График, изображенный на рис 2, строится на основе опытных данных. Зависимость  $p = f(t_n)$  может быть также представлена и в виде подробных таблиц теплофизических свойств веществ.

### 3. Экспериментальная установка

Принципиальная схема экспериментальной установки представлена на рис.3. Стальной герметичный паровой электрический котел (1), заполненный на 2/3 объема дистиллированной водой (2), покрыт слоем асбестовой изоляции. Внутри котла находится электронагреватель (3), сообщающий тепло воде. Для измерения температуры пара установлен в стальной герметичной капсуле жидкостный термометр (4). Пружинный манометр (5) служит для измерения избыточного давления пара в котле. Барометрическое давление атмосферного воздуха в помещении определяется при помощи настенного барометра (6). С помощью автотрансформатора (7) устанавливается напряжение, подаваемое на нагреватель котла.

Закон изменения величины температуры насыщенного пара с ростом его давления можно зафиксировать непосредственно во время проведения опыта при помощи пружинного образцового манометра и точного жидкостного лабораторного термометра. При этом необходимо иметь в виду, что параметром состояния является абсолютное давление, которое находится как сумма показаний манометра, установленного на котле, и барометра, определяющего величину давления атмосферного воздуха:

$$P = P_m + \frac{B}{735,6}, \text{ кгс/см}^2,$$

где  $P$ , кгс/см<sup>2</sup> - абсолютное давление пара в котле;

$P_m$ , кгс/см<sup>2</sup> - показания манометра (избыточное давление пара в котле);

$B$ , мм.рт.ст. -показания барометра, установленного в лаборатории.

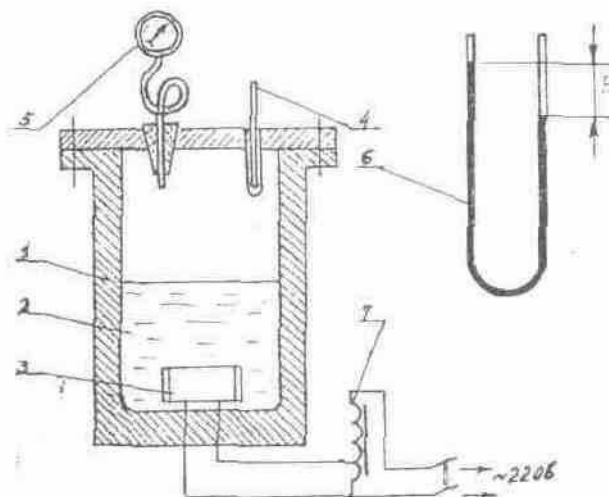


Рис. 3

#### 4. Порядок проведения опыта

4.1. Ознакомиться с приборами, имеющимися на лабораторном стенде, и определить цену деления их шкал.

4.2. Включить установку в электрическую сеть, установив напряжение при помощи регулировочного нагревателя котла (величину этого напряжения задает преподаватель, ведущий лабораторные занятия).

4.3. При достижении температуры воды в сосуде  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  проводить одновременное измерение давления и температуры водяных паров, образующихся в котле, занося показания термометра и манометра в журнал наблюдений по форме табл. 1.

Замеры удобнее производить при прохождении стрелки манометра через относительно крупные деления его шкалы, например  $0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 3,5$  и т.д.,  $\text{кгс}/\text{см}^2$ .

Таблица 1

№ П.П	$p_{\text{ман}}, \text{ кгс}/\text{см}^2$	$t_{\text{н}}, \text{ }^{\circ}\text{C}$			Примечание
		прямой ход	обратный ход	среднее значение	
1	2	3	4	5	6
1.					
2.					

4.4. При давлении по манометру, равном  $4,0 \text{ кгс}/\text{см}^2$ , немедленно отключить электронагреватель котла (помните, превышение давления в котле сверх  $4,0 \text{ кгс}/\text{см}^2$  - взрывоопасно!), а затем продолжать те же замеры, что и в предыдущем пункте, но уже при обратном ходе стрелки манометра, прекратив опыт при достижении стрелкой нулевого давления по манометру.

4.5. Определить для каждого режима измерения значения абсолютного давления и температуру насыщенных водяных паров в котле, сведя полученные результаты в табл.2.



Таблица 2

$P$ , кгс/см <sup>2</sup>												
$P$ , бар												
$P$ , МПа												
$t_{н}^{он}$ , °С												
$t_{н}^{табл}$ , °С												

На основе этой таблицы построить график зависимости  $t_{н}^{он} = f(p)$ ,  $t_{н}^{табл} = f(p)$  для исследованных пределов измерения давления.

В этой же координатной системе построить аналогичный график на основе данных таблиц термодинамических свойств воды и водяного пара.

Указать на возможные причины некоторого несовпадения этих кривых.

Литература: [1., с. 10-13; 37-44; 2., с. 9-10; 34-39].

### Контрольные вопросы к лабораторной работе №2

1. Виды давления и соотношения между ними.
2. Что такое температура насыщения? Как она зависит от давления?
3. Что такое степень сухости водяного пара? Диапазон изменения и размерность.
4. В каких состояниях может находиться водяной пар, в чем различие этих состояний и в чем сходство?
5. Определение параметров влажного насыщенного пара.
6. Диаграмма  $P-t$  для водяного пара. Ход основных линий на этой диаграмме. Свойства диаграммы.

### Лабораторная работа №3

#### Процессы изменения состояния влажного воздуха

#### 1. Цель работы

- 1.1. Определить параметры воздуха на входе в калорифер, после него и на выходе из испарительной камеры.
- 1.2. Построить в  $J,d$  - диаграмме процессы изменения состояния воздуха, происходящие во время опыта.
- 1.3. Определить по  $J,d$  - диаграмме точку росы для состояния воздуха на выходе из испарительной камеры.

#### 2. Теоретические основы

Влажным воздухом называется смесь сухого воздуха и водяного пара. Кроме обычных термодинамических параметров, состояние влажного воздуха характеризуется несколькими специфическими параметрами, к которым в первую очередь относятся абсолютная и относительная влажность воздуха, его влагосодержание и точка росы.

Под абсолютной влажностью  $\rho$  понимается количество парообразной влаги, содержащейся в 1 м<sup>3</sup> влажного воздуха. Поскольку и сам влажный воздух, и содержащийся в нем водяной пар занимают один и тот же объем, то по физическому смыслу абсолютная влажность совпадает с понятием плотности пара, входящего во влажный воздух, и может быть выражена через эту величину.

Относительной влажностью воздуха  $\varphi$  называется отношение абсолютной влажности  $\rho$  к максимальной возможной  $\rho_{\max}$  при данной температуре влажного воздуха.

Под влагосодержанием влажного воздуха понимается масса водяного пара, выраженная в

граммах, приходящаяся в смеси на 1 кг сухого воздуха  $d$  г/кг сух. возд..

Температура насыщения, соответствующая парциальному давлению пара, называется температурой точки росы. Если влажный воздух имеющий температуру, равную точке росы, мы будем охлаждать, то водяной пар содержащийся во влажном воздухе, будет конденсироваться, т.е. будет наблюдаться образование тумана (выпадение росы).

Водяной пар, входящий в небольших количествах во влажный воздух, при часто встречающихся на практике температурах конденсируется, т.е. ведет себя как реальный газ.

Это обстоятельство усложняет расчеты, делает расчетные формулы несколько более трудоемкими, чем обычные формулы для смесей идеальных газов. Поэтому при расчетах, касающихся влажного воздуха, часто пользуются графическими, аналитическим или графоаналитическим методами.

Графические расчеты выполняются с помощью  $J, d$  - диаграммы для влажного воздуха (рис. 4).

На диаграмме имеются линии постоянных влагосодержаний  $d$ , идущие вертикально, постоянных энтальпий  $J$  (прямые, проведенные под углом  $135^\circ$  к оси ординат), постоянных температур влажного воздуха (прямые линии, идущие под небольшим углом слева-вверх-направо) и кривых постоянных относительных влажностей  $\varphi$ . Зная любые два из этих параметров, можно найти на диаграмме –  $J, d$  точку, характеризующую состояние влажного воздуха, и по ней остальные параметры влажного воздуха.

Кривая  $\varphi=100\%$  является пограничной. Точки на ней соответствуют состоянию насыщенного воздуха. Область под этой кривой соответствует состояниям смеси влажного пара и сухого воздуха и называется областью "тумана".

Под кривой  $\varphi=100\%$  построена линия  $P_n = f(d)$ . Значения величины парциального давления водяного пара  $P_n$  можно прочесть на правой крайней ординате диаграммы.

Кроме того, на диаграмму пунктиром нанесены линии постоянных температур мокрого термометра, идущие под небольшим углом к линиям  $J=const$ .

В том случае, когда через психрометр протекает насыщенный воздух с относительной влажностью  $\varphi=100\%$ , испарения воды с марли мокрого термометра быть не может, т.е. мокрый термометр показывает одинаковую температуру с сухим термометром. Поэтому одноименные изотермы на кривой  $\varphi=100\%$  пересекаются.

### 3. Описание экспериментальной установки

Стенд представляет собой модель сушильной установки, в которой сушильным агентом является воздух, нагретый в калорифере, а высушиваемый материал - хлопчатобумажная ткань, смоченная водой (рис. 4).

Данный стенд также дает возможность исследовать процессы изменения состояния воздуха при контакте воздуха с водой различной температуры.

При работе установки воздух, забираемый из помещения, прогоняется вентилятором (1) последовательно через электрический нагреватель (калорифер) (2), где за счет подогрева повышается его влагоемкость, а затем через увлажнительную камеру (3), в которой за счет теплоотдачи от горячего воздуха происходит испарение в него влаги из непрерывно увлажняемого гигроскопического материала (4).

Дистиллированная вода для смачивания ткани в испарительной камере поступает из емкости (5). Ее температура замеряется термометром (6). Количество поступающей воды в испарительную камеру регулируется краном (7). Неиспарившаяся вода стекает в емкость (8).

Для измерения психрометрической разности температур воздуха, поступающего в калорифер, служит психрометр Ассмана (9). Термометр (10) измеряет температуру воздуха после калорифера, психрометр (11) - после испарительной камеры.

Для определения скорости воздуха, проходящего через установку, существуют дроссельная диафрагма (12) и тягонапоромер (13). Принцип определения скорости воздуха при помощи дроссельной диафрагмы и тягонапоромера подробно рассмотрен ранее.

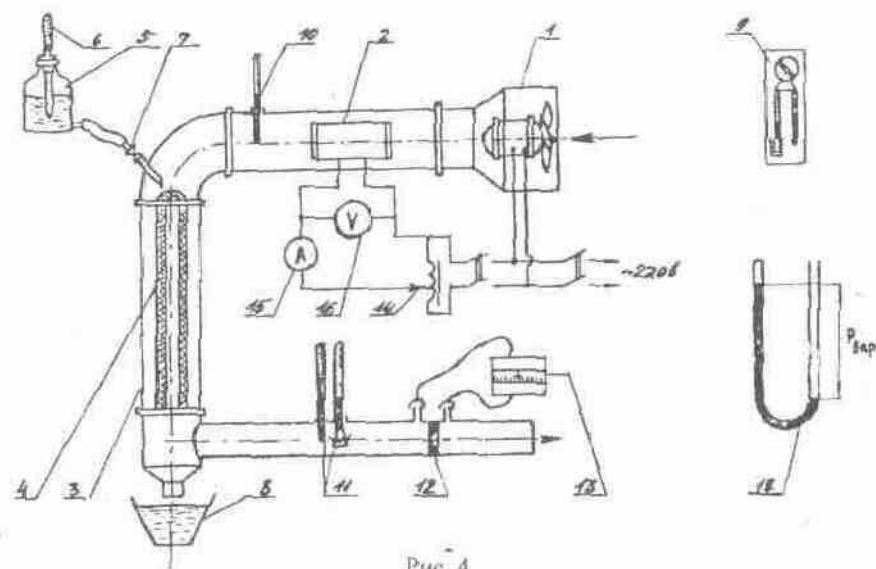


Рис. 4

С помощью лабораторного автотрансформатора (14) устанавливается напряжение, подаваемое на нагреватель. Для контроля питания нагревателя служат амперметр и вольтметр (15, 16).

Барометрическое давление воздуха в помещении измеряется барометром (17) (он может находиться вне лабораторного стенда).

Для определения относительной влажности воздуха применяются специальные приборы - психрометры.

Психрометр Августа состоит из двух ртутных термометров. Шарик одного термометра (обычно левого) держат сухим, в шарик другого - смоченным, для чего поверхность последнего обертывают марлей или батистом и конец ткани опускают в стаканчик с дистиллированной водой. Благодаря гигроскопичности ткани вода из стаканчика поднимается и смачивает шарик. Вследствие испарения влаги с поверхности шарика мокрого термометра (за счет поглощения из воздуха тепла, идущего на испарение влаги) температура воздуха в пограничном слое с мокрым шариком понижается, поэтому мокрый термометр показывает более низкую температуру, чем сухой. Разность в показаниях сухого и мокрого термометров принято называть психрометрической разностью. Очевидно, чем суше воздух, тем интенсивнее испарение с поверхности шарика мокрого термометра и тем больше психрометрическая разность, и наоборот. В частном случае, когда воздух насыщен водяными парами, психрометрическая разность равна нулю и оба термометра показывают одну и ту же температуру. Зная температуру по сухому термометру  $t^c$  и температуру по мокрому термометру  $t^m$ , можно определить относительную влажность воздуха.

Но для правильного измерения влажности воздуха по показаниям психрометра недостаточно знать  $t^c$  и  $t^m$ , надо знать и скорость движения воздуха около шарика мокрого термометра. Причем, чем больше скорость потока воздуха, обдувшего чувствительную часть термометра, тем меньше сказывается приток тепла излучением и теплопроводностью, искажающий показания психрометра.

Поэтому для точных измерений пользуются психрометром с обдуваемыми шариками или аспирационным психрометром Ассмана типа М-34, который снабжен специальным вентилятором, создающим поток воздуха, обдувающий шарик термометров, со скоростью 2 м/с.

Привод вентилятора осуществляется при помощи пружинного механизма или миниатюрного двигателя. Для предотвращения притока лучистого тепла чувствительная часть термометров экранируется трубками. Внешние поверхности всех металлических деталей психрометра никелированы или полированы.

#### 4. Порядок проведения работы

4.1. Пользуясь схемой и описанием экспериментальной установки, ознакомиться с ее устройством.

4.2. Залить в напорный бачок дистиллированную воду (ее температура задается преподавателем) и пустить установку в работу путем одновременного включения в сеть двигателя, вентилятора и электронагревателя воздушного калорифера-

4.3. При помощи автотрансформатора установить напряжение (указанное преподавателем), которое необходимо поддерживать постоянным в течение всего опыта.

4.4. Одновременно с этим открыть краник напорного бачка и пустить слабым потоком из него воду в испарительную камеру. Вода должна обильно смачивать слой гигроскопического материала, а небольшие излишки ее должны непрерывно стекать в поддон увлажнительной камеры.

4.5. Через каждые пять-десять минут производить запись показаний приборов, которыми оснащена установка, вплоть до достижения установившегося режима работы установки. На это будет указывать совпадение показаний всех контрольно-измерительных приборов в двух-трех смежных по времени сеансах измерений. Одновременно с этим с теми же интервалами контролировать наличие дистиллированной воды в бачках психрометров, при необходимости доливая ее. Данные измерений заносятся в табл. 1.

Таблица 1

№ п.п.	Время замера	Показания психрометров				Температура воздуха после калорифера	Показания тягонапоромера	Барометрическое давление
		до калорифера		После увлажнительной камеры				
	$\tau$ , сек	$t_{0}^c, ^\circ\text{C}$	$t_{0}^m, ^\circ\text{C}$	$t_{2}^c, ^\circ\text{C}$	$t_{2}^m, ^\circ\text{C}$	$\Delta p$ , Па	$4?$ , Па	$B$ , мм.рт.ст.
1.								
2.								

4.6. При установившемся режиме работы измерить относительную влажность воздуха, поступающего в калорифер. Для этого батист (ткань) на чувствительной части мокрого термометра смачивается дистиллированной водой при помощи специальной резиновой груши (применение водопроводной воды недопустимо, т.к. отложение солей при ее испарении приводит к значительным искажениям показаний психрометра).

Затем заводится пружина, и вентилятор психрометра начинает вращаться и создавать постоянный поток воздуха. Вследствие испарения воды с чувствительной части мокрого термометра его температура начинает понижаться. Отсчет показаний по сухому и мокрому термометрам производят в момент, когда температура мокрого термометра достигает минимума (обычно через три-четыре минуты).

4.7. Получив разрешение на окончание опыта, нужно отключить подачу воды из напорного бачка и питание установки эл.током из сети. Собранную из поддона увлажнительной камеры дистиллированную воду вылить обратно в напорный бачок.

4.8. На основе опытных данных, взятых для установившегося режима работы установки, по соответствующим формулам рассчитать параметры воздуха на выходе из испарительной камеры.

4.9 По показаниям психрометра найти на  $Y, \leq/$  - диаграмме точку, соответствующую параметрам комнатного воздуха, а затем, пользуясь диаграммой, найти его остальные параметры.

4.10. Построить в  $J, d$  - диаграмме процессы нагревания воздуха в калорифере и увлажнение его в испарительной камере.

## 5. Обработка экспериментальных данных

5.1. Парциальное давление водяных паров, находящихся во влажном воздухе, вычисляется по формуле

$$P_n = P_{n,n} - A(t^c - t^w) \cdot B, \text{ мм.рт.ст.},$$

где  $P_{n,n}$  - парциальное давление водяного пара в насыщенном состоянии при температуре мокрого термометра в мм.рт.ст. Определяется по таблице насыщенного водяного пара по температуре мокрого термометра (следует обратить внимание на то, что давление водяных паров в некоторых таблицах имеет разность в техн.атмосферах ( $1 \text{ кгс/см}^2 = 1 \text{ атм.} = 735,6 \text{ мм.рт.ст.}$ ;  $1 \text{ бар} = 10^5 \text{ Па} = 750 \text{ мм.рт.ст.}$ ),  $B$  — барометрическое давление атмосферного воздуха в мм.р.ст.,  $A$  - психрометрический коэффициент, который может быть подсчитан по соотношению

$$A = 0,00001 \left( 65 + \frac{6,75}{w} \right).$$

Скорость движения воздуха около психрометра  $W$  можно приравнять к скорости движения воздуха в сечении диафрагмы. Хотя сечение диафрагмы значительно меньше сечения воздуховода, однако стаканчик с водой, из которого непрерывно смачивается ткань мокрого термометра, а также часть мокрого термометра, находящаяся в воздуховоде, тоже значительно загромождают живое сечение воздуховода. Сечение диафрагмы подобрано так, чтобы оно было равно "живому" сечению воздуховода в месте установки психрометра.

Скорость движения воздуха в сечении диафрагмы определяется по формуле

$$w = \psi \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}, \text{ м/с},$$

где  $\Delta p$ ,  $\text{Н/м}^2$  - перепад давления воздуха при истечении через диафрагму;

$\rho$ ,  $\text{кг/м}^3$  - плотность влажного воздуха;

$\psi$  - скоростной коэффициент диафрагмы. (Определение  $\rho$  и  $\psi$  смотри выше)

5.2. Зная  $P_n$ , легко найти относительную влажность воздуха:

$$\varphi = \frac{P_n}{P_n} 100\%,$$

где  $P_n$  - парциальное давление водяного пара в насыщенном состоянии при температуре сухого термометра (определяется по таблицам насыщенного водяного пара).

5.3. Абсолютная влажность воздуха

$$\rho_n = \frac{P_n}{RT} = \frac{P_n}{R(t + 273,15)}, \text{ кг/м}^3,$$

где  $P_n$  - парциальное давление водяных паров, находящихся во влажном воздухе в  $\text{Н/м}^2$  ( $1 \text{ мм.рт.ст.} = 133,5 \text{ Н/м}^2$ );

$R$  — газовая постоянная водяного пара,  $R = 0,462 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$ .

5.4. Влагосодержание влажного воздуха

$$d = 622 \frac{P_n}{B - P_n}, \text{ г/кг сух.возд.}$$

5.5. Энтальпия влажного воздуха

$$J = t + d(2490 + 1,971t) \cdot 10^{-3}, \text{ кДж/кг сух.возд.},$$

где  $t$  - температура воздуха по сухому термометру,  $^{\circ}\text{C}$ .

## 6. Построение процесса в J, d — диаграмме

По результатам журнала наблюдений для установившегося режима строим J, d-диаграмме (рис. 5) процесс изменения состояния воздуха в экспериментальной установке.

Точку А, характеризующую состояние воздуха на входе в калорифер, находим на пересечении изотерм, соответствующих показаниям сухого и мокрого термометров в психрометре, установленном перед входом в калорифер.

Так как процесс нагрева воздуха в калорифере происходит при постоянном влагосодержании, то точка В, характеризующая состояние воздуха после калорифера, будет находиться на пересечении линии постоянной влагосодержания  $d_A = const$  и изотермы, соответствующей показанию термометра после калорифера.

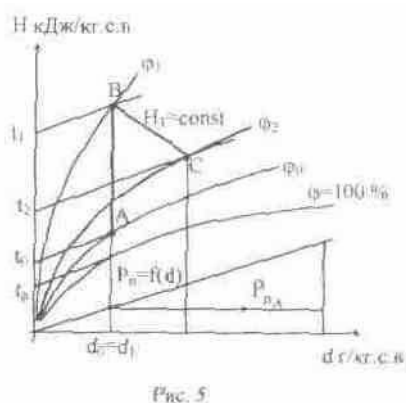


Рис. 5

Точка С, характеризующая состояние воздуха на выходе из испарительной камеры, находится на диаграмме аналогично т.А соответственно по показаниям сухого и мокрого термометров психрометра, установленного после испарительной камеры. Соединив точки В и С, получим процесс, происходящий в испарительной камере, его направление зависит от многих причин, в частности от температуры испаряемой воды и нагретого воздуха.

Для определения точки росы для данного воздуха надо от найденной в J, d-диаграмме точки, характеризующей состояние этого воздуха, опуститься вертикально вниз до пересечения с кривой  $\phi=100\%$ . Изотерма, проходящая через точку пересечения, дает температуру точки росы.

Литература: [1, с. 214-220; 2, с. 40-43].

### Контрольные вопросы к лабораторной работе №3

1. В каких состояниях может находиться влажный воздух? Чем это объясняется?
2. Основные параметры влажного воздуха. Их размерность.
3. Дать формулировку абсолютной влажности воздуха. Аналитическое определение абсолютной влажности.
4. Дать формулировку относительной влажности. Как она определяется аналитически и по J,d диаграмме влажного воздуха?
5. Дать формулировку температуры точки росы. Как она определяется по J,d диаграмме влажного воздуха?
6. Ход основных линий диаграммы J,d влажного воздуха.
7. Дать формулировку влагосодержания влажного воздуха. Как его можно определить аналитически?
8. Какие процессы происходят с воздухом в лабораторной установке и в каких элементах этой установки? Как эти процессы изображаются в диаграмме J,d влажного воздуха?

## Лабораторная работа №4

### Определение коэффициента теплопроводности изоляционного материала методом трубы

**1. Целью работы** является углубление знаний по теории теплопроводности, изучение методики экспериментального определения коэффициента теплопроводности изоляционных материалов и получение навыков в проведении экспериментальных работ.

В результате работы должны быть усвоены:

- физическая сущность процесса теплопроводности;
- содержание основного закона теплопроводности и его приложение к телам простой геометрической формы;
- понятие о коэффициенте теплопроводности и методах его определения.

### 2. Теоретические основы

Перенос тепла между частицами в твердом теле, неподвижной жидкости или газе, происходящий под действием разности температур, называется теплопроводностью. Внутренний механизм теплопроводности объясняется на основе молекулярно-кинетических представлений, перенос энергии при этом осуществляется вследствие теплового движения и энергетического взаимодействия между микрочастицами (молекулами, атомами, электронами), из которых состоит данное тело.

Совокупность значений температуры для всех точек пространства в данный момент времени называется температурным полем. Уравнение  $t=f(x, y, z, \tau)$  является математическим выражением такого поля. При этом, если температура не меняется во времени, поле называется установившимся (стационарным).

Температура может быть функцией одной, двух и трех координат, соответственно этому поле называется одно-, двух-, трехмерным. Наиболее простой вид имеет уравнение одномерного стационарного температурного поля:  $t=f(x)$ .

Самопроизвольно теплота переносится только в сторону убывания температуры. Количество тепла, переносимое через какую-либо изотермическую поверхность (геометрическое место точек, имеющих одинаковую температуру) в единицу времени, называется тепловым потоком  $Q$ , Вт. Тепловой поток, отнесенный к единице площади изотермической поверхности, называется плотностью теплового потока  $q$ , Вт/м<sup>2</sup>.

Изучая процесс теплопроводности в твердых телах, Фурье экспериментально установил, что количество переданной теплоты пропорционально падению температуры, времени  $\tau$  и площади сечения  $F$ , перпендикулярного направлению распространению теплоты. Математическое выражение этого основного закона теплопроводности - закон Фурье:

$$\delta Q = -\lambda \frac{dt}{dn} dF d\tau, \quad (1)$$

где  $dt / dn = \text{grad}t$ - градиент температуры (предел отношения изменения температуры  $\Delta t$  к расстоянию между изотермами по нормали  $\Delta n$ ),

$$\frac{dt}{dn} = \lim_{\Delta n \rightarrow 0} \left| \frac{\Delta t}{\Delta n} \right|;$$

$\lambda$  - коэффициент теплопроводности (характеризует способность материала проводить тепло и представляет собой количество теплоты, которое проходит в единицу времени через единицу площади изотермической поверхности при температурном градиенте, равном единице).

Коэффициент теплопроводности является физическим параметром вещества и в общем случае зависит от структуры, плотности, влажности, давления и температуры. Для веществ, встречающихся в природе, он изменяется в широких пределах:

для газов  $\lambda=(0,005-0,5)$  Вт/м\*град;

для капельных жидкостей  $\lambda=(0,08-0,7)$  Вт/м\*град;

для строительных и теплоизоляционных материалов  $\lambda=(0,02-3,0)$  Вт/м\*град;

для металлов  $\lambda=(20-458)$  Вт/м\*град.

Значение коэффициента теплопроводности определяется из опыта. Одним из методов его определения является так называемый метод цилиндра (плиты или шара).

### 3. Описание экспериментальной установки

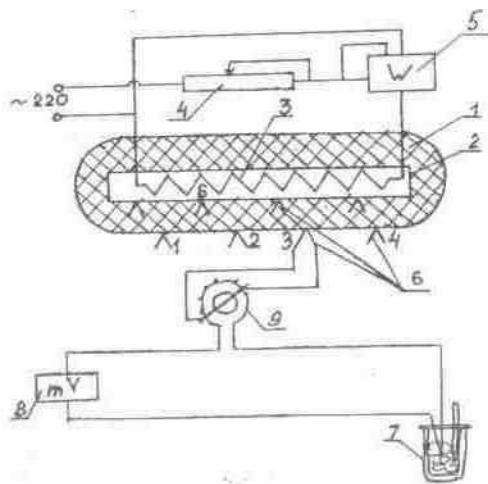


Рис. 6

Тепловая изоляция 1, коэффициент теплопроводности которой следует определить, монтируется на металлической трубке 2 длиной  $l=1,0$  и наружным диаметром 34 мм (рис. 6). Наружный диаметр изоляции указан на стенде.

Внутри трубы заложен электрический нагреватель 3, мощность которого регулируется реостатом 4 и измеряется точным ваттметром 5. Для измерения температур на внутренней и наружной поверхностях изоляции установлено восемь хромель-алюмелевых термопар 6. Термопары 5, 6, 7, 8, расположенные на внутренней поверхности изоляционного слоя, измеряют температуру  $t_{cm1}$ . Термопары 1, 2, 3, 4, расположенные на наружной поверхности изоляции (диаметр изоляции 72 мм), измеряют температуру  $t_{ст2}$ . Для термостатирования, общего для всех термопар холодного спая, служит термостат с тающим льдом (сосуд Дьюара).

Электродвижущая сила термопар измеряется с помощью переносного потенциала 8. Термопары подключаются к потенциометру при помощи переключателя 9.

Переход от значений ГЭДС в  $mV$ , возникающей в термопаре, к температуре на ее рабочем спая, равной температуре в измеряемой точке при  $t_{с.с.} = 0$  °С, нужно произвести по градуировочному графику, имеющемуся на стенде.

### 4. Порядок проведения работы

4.1. Ознакомиться с целью работы и теоретическими основами.

4.2. Пользуясь схемой установки и ее описанием, ознакомиться с ее устройством, размещением измерительных приборов и регулирующих приспособлений.

4.3. Включить в электрическую сеть нагреватель грубы, установив при помощи регулировочного реостата нужное напряжение (или мощность) в его цепи.

4.4. Через каждые 10-15 минут производить записи показаний измерительных приборов в таблицу наблюдений с тем, чтобы обнаружить наступление стационарного режима, признаком которого является постоянство показаний потенциометра (или милливольтметра) для одних и тех же термопар на протяжении двух-трех замеров при неизменной мощности электрического нагрева геля

4.5. После достижения установившегося режима опыт прекратить, отключив установку от электрической сети.

4.6. Включение и выключение электрического питания прибора, равно как и измерение



его величины, производятся в присутствии или под наблюдением преподавателя или лаборанта.

Таблица наблюдений

№ п. п.	W=JU, Вт	Показания милливольтметра								Температура холодного спая, t <sub>хс</sub>	Примечание
		Наружные термопары, t <sub>сr2</sub> , mV				Внутренние термопары, t <sub>сr1</sub> , mV					
		1	2	3	4	5	6	7	8		
1.											
2.											
...											

## 5. Методика расчетов

При работе установки тепло, выделяемое электронагревателем, проходит последовательно через стенку трубы, затем через слой изоляционного материала, покрывающего ее, и после этого, за счет конвекции и излучения, теряется с поверхности изоляции в окружающую среду. Количество тепла Q, которое при установившемся тепловом состоянии системы выделяется нагревателем, может быть определено по формуле

$$Q = W = JU. \quad (2)$$

Пренебрегая потерям тепла через концы трубы, можно считать, что все тепло, выделяемое электрическим нагревателем, проходит через кольцевой слой изоляции и определяется следующим уравнением теплопроводности для одномерного теплового потока, записанным применительно к цилиндрическому слою изоляции:

$$Q = \frac{2\pi\lambda l(t_{cm1} - t_{cm2})}{\ln \frac{d_2}{d_1}}, \text{ Вт}, \quad (3)$$

где  $\lambda$ , Вт/м\*град - коэффициент теплопроводности исследуемого материала;

$l$ , м - длина трубы;

$d_1, d_2$ , м - внутренний и наружный диаметры цилиндрического слоя материала;

$t_{cm1}, t_{cm2}$ , °C - средние температуры внутренней и внешней поверхностей цилиндрического слоя изоляции.

Если измерить  $l, d_1, d_2, t_{сr1}, t_{сr2}$  и  $W$ , то из уравнения теплового баланса с учетом (2, 3) можно определить значение коэффициента теплопроводности

$$\lambda = \frac{JU \ln \frac{d_2}{d_1}}{2\pi l(t_{cm1} - t_{cm2})}, \text{ Вт/(м·град)}. \quad (4)$$

Вычисленный коэффициент теплопроводности относится к средней температуре изоляции

$$t_{cp} = \frac{t_{cm1} + t_{cm2}}{2}, \text{ } ^\circ\text{C}.$$

## 6. Порядок расчетов

6.1. Определить среднюю температуру на поверхности трубы по данным, взятым из таблицы наблюдений для стационарного режима:

$$t_{cm1} = \frac{t_5 + t_6 + t_7 + t_8}{4}, \text{ mV}.$$

6.2. Подобным образом определить среднюю температуру на наружной поверхности изоляции

$$t_{cm2} = \frac{t_1 + t_2 + t_3 + t_4}{4}, \text{ mV}.$$

6.3. По градуировочному графику найти значение  $t_{cm1}$  и  $t_{cm2}$  в градусах Цельсия.

6.4. По данным, взятым из таблицы наблюдений для стационарного режима работы установки, на основе уравнения (4) определить коэффициент теплопроводности.

6.5. Сопоставить значение этой величины с табличными значениями коэффициентов теплопроводности для различных материалов.

Литература: [1, с. 315-319, 329-332; 2, с. 69-77; 3, с. 8-12, 19-27].

#### Контрольные вопросы к лабораторной работе №4

1. Виды передачи тепла, их физическая суть.
2. Записать формулу дифференциального уравнения Фурье для определения удельного теплового потока и дать объяснение всем его сомножителям.
3. Что такое температурный градиент? Его аналитическая запись и графическое изображение.
4. Дать формулировку коэффициента теплопроводности, его размерность. От чего зависит этот коэффициент?
5. Записать уравнение Фурье для плоской и цилиндрической поверхностей. Термическое сопротивление теплопроводности плоской и цилиндрической стенок.
6. Записать уравнение теплового баланса в раскрытом виде для установившегося режима лабораторной установки.
7. Что такое установившийся тепловой режим? В чем признак этого режима в данной лабораторной установке?

#### Лабораторная работа №5

Определение коэффициента теплоотдачи при свободной конвекции воздуха около горизонтальной трубы

##### 1. Цель работы

Определить экспериментальным путем значения коэффициента теплоотдачи и познакомиться с методикой его расчета.

##### 2. Теоретические основы

Процесс конвективной теплоотдачи - это сложный перенос тепла, включающий в себя передачу теплопроводностью в тончайшем (пограничном) слое жидкой или газообразной среды, примыкающем к поверхности твердого тела, и перенос тепла конвекцией (иначе перемешиванием) внутри данной среды. Перемешивание жидкости или газа может быть вызвано только разностью температур поверхности тела и окружающей его среды (естественная, иначе, свободная конвекция) или же посторонним побудителем (вентилятором, насосом), когда на процесс естественной конвекции около твердого тела накладывается направленное движение основного потока среды (искусственная, иначе, вынужденная конвекция).

Для определения количества тепла  $Q_k$ , проходящего в единицу времени через поверхность твердого тела площадь  $F$ ,  $m^2$  при стационарном тепловом режиме (при  $\Delta t = const$  пользуются уравнением

$$Q_k = \alpha_k \Delta t F, \text{ Вт}, \quad (1)$$

где  $\alpha_k$  - коэффициент пропорциональности, называемый коэффициентом конвективной теплоотдачи,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град})$ ;

$\Delta t$  - разность температур (температурный напор) между температурой поверхности твердого тела ( $t_c$ ) и температурой среды ( $t_{ж}$ ), или наоборот, в зависимости от направления движения тепла,  $^{\circ}\text{C}$ .

Коэффициент  $\alpha_k$  характеризует интенсивность переноса тепла через поверхность кон-

такта «твердое тело - газ (или жидкость)» и имеет определенный физический смысл. Численное значение  $\alpha_k$ , как следует из уравнения (1), равно количеству тепла в Дж, прошедшему через  $1 \text{ м}^2$  поверхности твердого тела за 1 с при температурном напоре в  $1 \text{ }^\circ\text{C}$  в результате конвективной теплоотдачи.

Чтобы пользоваться уравнением (1), значение  $\alpha_k$  должно быть известно. Его определяют, пользуясь теорией подобия, согласно которой все величины, влияющие на теплоотдачу, собираются в критерии подобия. Взаимосвязь между критериями (или критериальная зависимость) устанавливается экспериментальным путем. В частности, для конвективной теплоотдачи при естественной конвекции в неограниченном (большом) объеме критериальная зависимость имеет вид:

$$Nu = C(Gr \cdot Pr)^n, \quad (2)$$

Где

$$Nu = \frac{\alpha_k \ell}{\lambda}, \quad (3)$$

$Nu$  - критерий (или число) Нуссельта;

$$Pr = \frac{\nu}{a} = \frac{\nu C_p \rho}{\lambda}, \quad (4)$$

$Pr$  - критерий (или число) Прандтля;

$$Gr = \frac{g \ell^3}{\nu^2} \beta \Delta t, \quad (5)$$

$Gr$  - критерий (или число) Грасгофа.

Обозначения величин, входящих в уравнения (3)-(5), следующие:

$\ell$  - характерный размер, м. В частности для труб

$$\ell = d, \quad (6)$$

$d$  - диаметр трубы, м;

$\lambda$  - коэффициент теплопроводности среды, Вт/(м<sup>2</sup>\*град);

$\nu$  - коэффициент кинематической вязкости среды, м<sup>2</sup>/с;

$g = 9,81$  - ускорение силы тяжести, м/с<sup>2</sup>;

$C_p$  - удельная массовая изобарная теплоемкость окружающей среды, Дж/(кг\*град);

$\rho$  - плотность среды, кг/м<sup>3</sup>;

$\beta$  - коэффициент объемного расширения среды, 1/град.

Для газов

$$\beta = \frac{1}{T}, \quad (7)$$

$T$  - абсолютная температура среды, К;

$\Delta t$  - температурный напор, <sup>0</sup>С или К.

Все физические свойства среды, указанные выше, выбираются из таблиц при так называемой "определяющей" температуре

$$t_{\text{опр}} = \bar{t}_{\text{ж}}, \text{ } ^\circ\text{C} \quad (8)$$

Значения коэффициентов "с" и "n", входящих в уравнение (2), находятся опытным путем и зависят от характера движения окружающей среды (газа или жидкости) в пограничном слое. Вид движения среды около твердого тела определяется формой и ориентацией поверхности тела в пространстве, а также численной величиной произведения ( $Gr \cdot Pr$ ). В частности для горизонтально расположенной цилиндрической трубы рекомендуемые значения "с" и "n" приведены в табл. 1

Таблица 1

Значения ( $Gr \cdot Pr$ )	$c$	$n$
$10^{-3} - 10^3$	1,18	1/8
$10^{-3} - 10^8$	0,5	1/4

В случае проведения экспериментальных исследований величина  $Q_k$ , как правило, бывает известна, тогда уравнение (1) используют для определения  $d_k$ :

$$d_k = \frac{Q_k}{F \Delta t}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град}). \quad (9)$$

### 3. Экспериментальная установка

Для выполнения поставленной в работе цели служит установка, схема которой представлена на рис. 7.

Основной элемент установки - стальная трубка 1 (ее размеры: длина 1650 мм, наружный диаметр 11 мм) - обогревается электрическим током, проходящим по трубе. Такой способ обогрева позволяет уменьшить тепловую инерционность установки и провести во время лабораторного занятия достаточное количество опытов. Большой по величине ток, нагревающий опытную трубку, создается силовым трансформатором 2 с постоянным коэффициентом трансформации. Контроль тока производится по амперметру 3. Установка необходимого теплового режима осуществляется с помощью лабораторного автотрансформатора (ЛАТРА) 4. Температура поверхности опытной трубки измеряется четырьмя хромель-копелевыми термопарами, рабочие спаи которых заданы в различных точках этой поверхности, а холодный спай (один на все термопары) находится в сосуде Дьюара 6 с тающим льдом. Все термопары через переключатель (на схеме не показан) соединены с цифровым милливольтметром 7, который измеряет термо – Э.Д.С. термопар.

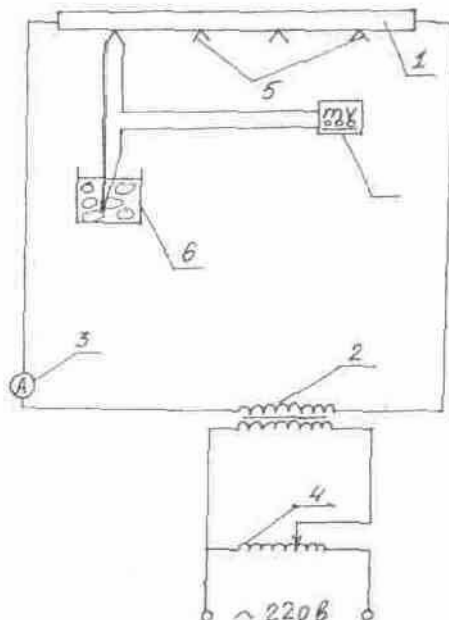


Рис. 7

#### 4. Методика проведения работы

- 4.1. Ознакомиться с целью работы и теоретическими основами.
- 4.2. Пользуясь схемой установки и ее описанием, ознакомиться с размещением измерительных приборов и регулирующих приспособлений.
- 4.3. Включить установку.
- 4.4. Рукояткой ЛАТРа установить начальный режим, указанный преподавателем.
- 4.5. Через 11 минут записать показания амперметра и милливольтметра в таблицу наблюдений (табл. 2).

Таблица 2

№ п.п.	A	П				Температура воздуха в помещении, t <sub>в</sub>
		1	2	3	4	
1.						
2.						

- 4.6. Сменить режим (шаг изменения тока и количество режимов указывается преподавателем).
- 4.7. Выполнить пункт 4.5.
- 4.8. Записать в табл.2 температуру воздуха t<sub>в</sub> в помещении.
- 4.9. Выключить установку, предварительно возвратив рукоятку ЛАТРа в исходное положение.

#### 5. Методика расчетов

В стационарном тепловом режиме весь тепловой поток  $Q_{эл.н.}$ , выделяющийся в опытной трубке при прохождении через нее электрического тока, уходит через боковую поверхность в воздух в результате теплоотдачи  $Q_{общ}$  (теплом, уходящим через торцы трубки теплопроводностью, пренебрегают в связи с малой площадью торцевой поверхности трубки). В этом случае уравнение теплового баланса установки будет иметь вид:

$$Q_{эл.н.} = Q_{общ} \quad (10)$$

Общий тепловой поток, уходящий от боковой поверхности опытной трубки, состоит из конвективного  $Q_k$  и лучистого  $Q_l$ , теплового потока, т.е.

$$Q_{общ} = Q_k + Q_l \quad (11)$$

Тепло, выделяющееся в трубке  $Q_{эл.н.}$  в работе, определяется по формуле

$$Q_{эл.н.} = J^2 R_t = J^2 R_0 (1 + \alpha t_{mp}) \quad (12)$$

где  $R_t$  - электрическое сопротивление опытной трубки при температуре;

$R_0 = 1,08 \cdot 10^{-2}$  Ом - электрическое сопротивление трубки при  $t_{mp} = 0$  °С;

$\alpha = 0,0035$  1/°С - температурный коэффициент сопротивления материала трубки (найден опытным путем).

Температура опытной трубки определяется по среднему значению Э.Д.С. всех термопар:

$$E_{сп} \approx \frac{E_1 + E_2 + E_3 + E_4}{4}, \text{ мВ} \quad (13)$$

с помощью градуировочного графика (на лабораторном стенде) либо расчетным путем по уравнению

$$t_{mp} \approx 1,92 + 14,47 E_{сп} - 3,53 \cdot 10^{-3} E_{сп}^2 \quad (14)$$

Тепловой поток излучения  $Q_l$ , идущий от опытной трубки, определяется по закону Стефана-Больцмана:

$$Q_{\kappa} = C_{np} \left( \left( \frac{T_{mp}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_a}{100} \right)^4 \right) F = 4,25 \left( \left( \frac{T_{mp}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_a}{100} \right)^4 \right) \pi d l, \quad (15)$$

где  $C_{np} = 4,25 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}^4$  - приведенный коэффициент излучения системы "стальная трубка - окружающие тела (стены, потолок, стенд)"; поскольку площадь поверхности окружающих тел значительно больше поверхности опытной трубки,  $C_{np} = C_{cm} = 4,25 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}^4$ .

Конвективный тепловой поток поверхности трубки определяется из уравнения (11):

$$Q_{\kappa} = Q_{обм} - Q_{\kappa}, \quad (16)$$

В то же время данный тепловой поток можно посчитать по уравнению Ньютона-Рихмана (1), откуда определяется опытное значение коэффициента конвективной теплоотдачи  $\alpha_{\kappa}$ .

$$\alpha_{\kappa}^{оп} = \frac{Q}{F \Delta t} = \frac{Q_{\kappa}}{\pi d l (t_{mp} - t_a)}, \quad (17)$$

Найденное опытное значение коэффициента конвективной теплоотдачи  $\alpha_{\kappa}^{оп}$  необходимо сравнить с расчетным значением  $\alpha_{\kappa}^{расч}$ , подсчитанным по критериальному уравнению (2). Для этого предварительно с помощью таблицы теплофизических свойств воздуха по температуре воздуха в помещении находятся:

- число Прандля  $Pr$ ;
- коэффициент теплопроводности воздуха  $\lambda_{\text{в}}$ , Вт/м·К;
- коэффициент кинематической вязкости  $\nu_{\text{в}}$ , м<sup>2</sup>/с;
- коэффициент объемного расширения  $\beta_{\text{в}}$ , 1/К.

Данные свойства подставляются в (4) и (5), а затем по уравнению (2) считается число Нуссельта  $Nu$ , причем коэффициенты "С" и "п", входящие в (2), берутся из табл.1.

Из уравнения (3) для числа  $Nu$  находится расчетное значение коэффициента теплоотдачи  $\alpha_{\kappa}^{расч}$ :

$$\alpha_{\kappa}^{расч} = \frac{Nu \lambda_{\text{в}}}{d}, \quad (18)$$

где  $d = 10 \text{ мм} = 1 \cdot 10^{-2} \text{ м}$  - диаметр трубки.

Опытное и расчетное значения сравниваются, и находится ошибка определения опытного значения коэффициента теплоотдачи

$$\delta_{\alpha} = \frac{\alpha_{\kappa}^{оп} - \alpha_{\kappa}^{расч}}{\alpha_{\kappa}^{расч}} 100\%. \quad (19)$$

## 6. Порядок расчета

- 6.1. По уравнению (13) находится  $E_{cp}$ .
- 6.2. По градуировочному графику или по уравнению (14) определяется  $t_{cp}$ .
- 6.3. По уравнению (12) подсчитывается  $Q_{эл.н.}$ .
- 6.4. По уравнению (15) подсчитывается  $Q_{\kappa}$ .
- 6.5. По уравнению (16) подсчитывается  $Q_{\kappa}$ .
- 6.6. По уравнению (17) вычисляется  $\alpha_{\kappa}^{оп}$ .
- 6.7. По таблице теплофизических свойств воздуха при  $t_{\text{в}}$  находятся  $\lambda_{\text{в}}$ ,  $\nu_{\text{в}}$ ,  $\beta_{\text{в}}$ ,  $Pr$ .
- 6.8. По уравнению (5) определяется число  $Gr$ .
- 6.9. Подсчитывается  $Gr \cdot Pr$  и по его величине из табл. 1 берутся значения "с" и "п".
- 6.10. По уравнению (2) подсчитывается число  $Nu$ .
- 6.11. По уравнению (18) определяется  $\alpha_{\kappa}^{расч}$ .
- 6.12. По уравнению (19) вычисляется ошибка определения опытного значения коэффициента конвективной теплоотдачи.

Данный порядок расчета выполняется для каждого теплового режима, причем с целью освобождения времени студентов на усвоение теории конвективного теплообмена один из режимов рассчитывается студентами в лаборатории, а остальные режимы - с помощью ЭВМ.

## Контрольные вопросы к лабораторной работе №5

1. Физическая суть конвективного теплообмена. В чем разница между конвективными теплообменом и конвективной теплоотдачей?
2. Записать закон Ньютона для конвективной теплоотдачи и объяснить его множители. Термическое сопротивление конвективной теплоотдачи.
3. В чем физический смысл конвективного коэффициента теплоотдачи? Его размерность
4. В какой критерий входит коэффициент конвективной теплоотдачи? Как он подсчитывается?
5. От каких факторов зависит коэффициент конвективной теплоотдачи?
6. Записать уравнение теплового баланса в раскрытом виде для лабораторной установки и объяснить его.
7. Общий вид критериального уравнения для свободного движения среды.
8. Общий вид критериального уравнения для вынужденного движения среды.

## Лабораторная работа №6

Определение степени черноты полного излучения серого тела методом сравнения с эталонным телом

### 1. Цель работы

Определить экспериментальным путем степень черноты полного излучения стальной поверхности методом сравнения.

### 2. Теоретические основы

Тепловое излучение представляет собой процесс рассеивания внутренней энергии нагретого тела при помощи электромагнитных волн определенной длины (тепловых лучей) и фотонов и поэтому характеризуется тремя основными параметрами: частотой излучения  $\nu$ , длиной волн  $L$  и скоростью распространения волны или фототока (скоростью света). Излучение нагретых тел и сред можно рассматривать как во всем спектре длин волн от 0 до  $\lambda$ , так и в узком диапазоне длин от 0 до  $\infty$ . В первом случае излучение называется полным (или интегральным), во втором - монохроматическим. В дальнейшем речь пойдет только о полном излучении.

В качестве одной из характеристик излучаемых свойств тел и сред выступает полная излучательная способность  $E$ . Она представляет собой количество энергии, излучаемой при данной температуре во всем интервале длин волн с единицы поверхности в единицу времени:

$$E = \frac{Q_{\lambda}}{F_{\tau}}, \text{ Вт/м}^2. \quad (1)$$

Основным законом теплового излучения является закон Стефана-Больцмана, устанавливающий зависимость полной излучательной способности абсолютно черного тела  $E_0$  от температуры  $T$ :

$$E_0 = C_0 \left( \frac{T}{100} \right)^4, \text{ Вт/м}^2, \quad (2)$$

где  $C_0 = 5,67 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}^4$  - коэффициент излучения абсолютно черного тела.

В природе абсолютное большинство тел и сред являются нечерными (серыми), поэтому их температурная зависимость отличается от уравнения (2). В связи с этим расчеты теплового излучения серых тел проводятся по модифицированному закону Стефана-Больцмана

$$E = C_0 \varepsilon \left( \frac{T}{100} \right)^4, \text{ Вт/м}^2, \quad (3)$$

где  $E$  - полная излучательная способность серого тела;  
 $\varepsilon = E / E_0$  - степень черноты полного излучения серого тела.  
 $E_0$

Величина степени черноты  $\varepsilon$  колеблется в пределах от 0 до 1 и является сложной функцией природы излучающего тела, его температуры, состояния поверхности. Поэтому зачастую степень черноты тела сама является объектом исследований.

Лучистый теплообмен между двумя серыми телами возможен в следующих случаях:

1. Между двумя твердыми телами, если пространство между ними заполнено прозрачной (для тепловых лучей) средой.

2. Между твердым телом (или жидкостью) и газом, если этот газ поглощает лучистую энергию.

Результирующий тепловой поток  $Q_{1-2}$ , идущий с тела 1 (более нагретого) на тело 2 для стационарных тепловых условий (когда температуры тел, участвующих в теплообмене, постоянны), определяется по уравнению

$$Q_{1-2} = C_0 \varepsilon_{np} \left[ \left( \frac{T_H}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_B}{100} \right)^4 \right] F_{1-2}, \text{ Вт}, \quad (4)$$

где  $\varepsilon_{np}$  — приведенная степень черноты системы тел, зависящая от степени черноты каждого тела, а также от геометрической формы и взаимного расположения тел;

$F_{1-2}, \text{ м}^2$  - взаимная излучающая поверхность, зависящая от размеров излучающих тел, их формы и взаимного расположения. В самом общем случае приведенная степень черноты системы из двух серых тел определяется по выражению

$$\varepsilon_{np} = \frac{1}{1 + (1 - \varepsilon_1) \varphi_{1-2} + (1 - \varepsilon_2) \varphi_{2-1}}, \quad (5)$$

где  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  — степень черноты тела 1 и 2 соответственно;

$\varphi_{1-2}$  и  $\varphi_{2-1}$  - средние по поверхности угловые коэффициенты излучения тела 1 на тело 2 и тела 2 на тело 1, зависящие от формы и взаимного расположения тел.

Так как нагретое тело отдает свое тепло не только излучением, но и конвекцией, то при исследовании излучательных свойств данного тела очень важно выделить или оценить конвективную составляющую общего теплового потока, идущего от тела.

### 3. Описание экспериментальной установки

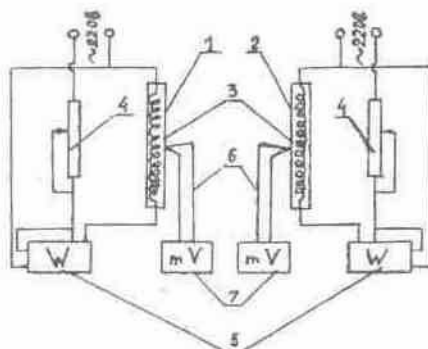


Рис. 8

Экспериментальная установка (рис.8) состоит из двух вертикально расположенных цилиндров, один из которых (рабочий) выполнен из стали (1), а второй (эталонный) - из алюминия (2). Оба цилиндра имеют одинаковые размеры и площадь боковой поверхности  $F=0.035 \text{ м}^2$ . Внутри цилиндров расположены электрические спирали (3), питающиеся электрическим током через регулировочные реостаты (4). Для измерения мощности, подаваемой на спирали, в их цепях установлены ваттметры (5). Определение температуры поверхности



производится с помощью хромель-копелевых термопар (6), зачечаненных в каждый цилиндр Э. Д. С. термопар измеряется лагометром (7), проградуированным в градусах температурной шкалы Цельсия. При положении переключателя "вправо" лагометр показывает разность температур между поверхностью стального цилиндра (рабочий спай термопары) и температурой воздуха (свободный спай термопары), а при положении "влево" - разность температур между поверхностью алюминиевого цилиндра и воздуха.

#### 4. Методика проведения работы

- 4.1. Ознакомиться с целью работы, теоретическими основами.
- 4.2. Пользуясь схемой установки и ее описанием, ознакомиться с устройством установки и размещением измерительных приборов и регулирующей аппаратуры.
- 4.3. Включить установку в сеть и установить первоначальное значение мощности (по указанию преподавателя) нагревателей обоих цилиндров одинаковыми.
- 4.4. Через каждые семь-десять минут записывать показания всех приборов в таблицу наблюдений.

Таблица

№ П.П.	Алюминиевый цилиндр		Стальной цилиндр		Температура воздуха, $t_{в}$ , °С
	$W_{ал}$	$\Delta t_{ал}$	$W_{ст}$	$\Delta t_{ст}$	
	Вт	°С	Вт	°С	
1.					
2.					
...					

4.5. По достижении установившегося теплового режима, о чем будет свидетельствовать постоянство во времени температур обоих цилиндров, изменить (увеличить) мощность нагревателя в стальном цилиндре на 2,5-7,5 Вт.

4.6. Выполнить указания пункта 4.4.

4.7. Если по достижении установившегося теплового режима температуры обоих цилиндров окажутся одинаковыми, закончить опыт и выключить установку. В случае отсутствия равенства температур перейти к выполнению пункта 4.5.

#### 5. Методика расчетов

Определение степени черноты стальной поверхности производится методом сравнения теплоотдачи при стационарных тепловых условиях от двух геометрически одинаковых цилиндров при условии равенства температур поверхности этих цилиндров:

$$t_{ст} = t_{ал} = t_{возд.} \quad (6)$$

В качестве эталонного служит цилиндр из алюминия с известной степенью черноты  $\epsilon_{ал} = 0,11$ .

Тепловые балансы каждого цилиндра включают в себя как излучательную  $Q_{л}$ , так и конвективную  $Q_{к}$  составляющую общего теплового потока  $Q_{общ}$ .

Для стального цилиндра

$$Q_{общ,ст} = Q_{л,ст} + Q_{к,ст}, \text{ Вт.} \quad (7)$$

Для алюминиевого цилиндра

$$Q_{общ,ал} = Q_{к,ал} + Q_{л,ал}, \text{ Вт.} \quad (7')$$

Общее количество тепла, идущее за 1 секунду с каждого цилиндра, определяется по выражениям:

$$Q_{общ,ст} = W_{ст} \quad (8)$$

$$Q_{общ,ал} = W_{ал} \quad (8')$$

где  $W_{ст}$  и  $W_{ал}$ , Вт - мощности спиралей внутри стального и алюминиевого цилиндров.

Тепловой поток, идущий от каждого цилиндра в результате конвективной теплоотдачи  $Q_k$  в стационарных тепловых условиях определяется по уравнениям:

$$Q_{k,ст} = \alpha_{к,ст} (t_{ст} - t_e) F_{ст}, \quad (9)$$

$$Q_{k,ал} = \alpha_{к,ал} (t_{ал} - t_e) F_{ал}, \quad (9')$$

где  $\alpha_{к,ст}$  и  $\alpha_{к,ал}$  Вт/м<sup>2</sup>•°С - коэффициенты конвективной теплоотдачи с поверхности стального и алюминиевого цилиндра.

$$F_{ст} = F_{ал} = F_{пол}, \text{ м}^2, \quad (10)$$

где  $F_{ст}$  и  $F_{ал}$  - площади боковой поверхности стального и алюминиевого цилиндра;

$t_e$  - температура воздуха в помещении.

Так как  $\alpha_k$  не зависит от материала поверхности, то в случае (6), а следовательно, и равенства температурных напоров, следует:

$$\alpha_{к,ст} = \alpha_{к,ал}, \quad (11)$$

$$Q_{к,ст} = Q_{к,ал}. \quad (12)$$

Лучистую составляющую общего теплового потока  $Q_l$  определяют по уравнению (4). При этом в связи с тем, что определение искомой в работе величины  $\epsilon_{ст}$  происходит в момент равенства температур поверхностей цилиндров и результирующий тепловой поток между ними будет равен 0, то тепло излучения с каждого цилиндра идет на другие тела (стены помещения, стенды, приборов), имеющие комнатную температуру  $T_{..}$ . В этих условиях (когда излучающее тело находится внутри другого, поверхность которого значительно больше излучающего тела)

$$\varphi_{1,2} = 1, \varphi_{2,1} = 0, \quad (13)$$

$$F_{1,2} = F_{пол}. \quad (14)$$

Тогда уравнение (5) для данного случая примет вид:

$$\epsilon_{ст} = \epsilon_1 = \epsilon_{пол} \quad \text{или} \quad (15)$$

$$\epsilon_{ст} = \epsilon_{ст} \text{ и } \epsilon_{ст} = \epsilon_{ал}. \quad (15')$$

А уравнение (4) запишется с учетом (15), (15') и (14) в виде:

$$Q_{l,ст} = C_{\sigma} \epsilon_{ст} \left[ \left( \frac{T_{гр}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{н}}{100} \right)^4 \right] F_{пол}, \quad (16)$$

$$Q_{l,ал} = C_{\sigma} \epsilon_{ал} \left[ \left( \frac{T_{гр}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{н}}{100} \right)^4 \right] F_{пол}. \quad (16')$$

Если теперь в уравнения тепловых балансов (7) и (7') подставить выражения (8), (8') и (12), то при вычитании (7') из (7) с учетом (6) получим:

$$W'_{ст} - W_{ал} = C_{\sigma} (\epsilon_{ст} - \epsilon_{ал}) \left[ \left( \frac{T_{гр}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{н}}{100} \right)^4 \right] F_{пол}. \quad (17)$$

Из уравнения (17) следует, что при равенстве температур поверхностей цилиндров получающееся различие электрических мощностей, подаваемых на нагреватели, объясняется лишь различием степени черноты данных цилиндров. Из выражения (17) можно определить неизвестную степень черноты стального цилиндра

$$\varepsilon_{\text{цм}} = \varepsilon_{\text{ст}} + \frac{W_{\text{см}} - W_{\text{ст}}}{C_0 F_{\text{цм}} \left[ \left( \frac{T_{\text{пол}}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{\text{в}}}{100} \right)^4 \right]} \quad (18)$$

## 6. Порядок расчета

6.1. Определить температуру поверхности цилиндров, для чего необходимо сделать поправку на температуру холодного спая  $t_{\text{хс}}$ , которая берется равной температуре воздуха в помещении  $t_{\text{в}}$

$$T_{\text{пол}} = \Delta t + t_{\text{в}} + 273, \text{ К.}$$

$$T_{\text{в}} = t_{\text{в}} + 273, \text{ К.}$$

6.2. По данным, взятым из таблицы наблюдения, на основании уравнения (18) определить степень черноты стали.

6.3. Сопоставить значение этой величины с табличными значениями.

Литература: [1, с.421-422, 424-433; 2, с.90-96; 3, с.160-182].

### Контрольные вопросы к лабораторной работе №6

1. Физическая суть передачи тепла излучением.
2. Закон Стефана-Больцмана для теплоотдачи излучением между двумя серыми телами.
3. Что такое абсолютное черное и серое тело для передачи тепла излучением?
4. Формула для приведенного коэффициента излучения системы параллельно расположенных поверхностей.
5. Что такое степень черноты серого тела? Диапазон его изменения.
6. Записать уравнение теплового баланса для одного из цилиндров лабораторной установки и объяснить его.
7. Зачем в работе необходимо выравнивать температуру поверхностей обоих цилиндров?

### Библиографический список

1. **Нащокин В.В.** Техническая термодинамика и теплопередача. -М.: Высшая школа, 1975.- 469 с,
2. Теплотехника: учеб. для вузов/**А.П. Басканов, В.Б. Берг, О.К. Витт** и др./Под ред А.П. Баканова. -М.: Энергоатомиздат., 1991.-203 с.
3. **Михеев М.А., Михеева И.М.** Основы теплопередачи. -М.: Энергия, 1977. -344с.

Насыщенный водяной пар (по давлениям)

Таблица 1

p, бар	t <sub>н</sub> , °C	V', м <sup>3</sup> /кг	V'', м <sup>3</sup> /кг	h', кДж/кг	h'', кДж/кг	г, кДж/кг	S', кДж/(кг*град)	S'', кДж/(кг*град)
2,0	120,23	0,0010605	0,8854	504,8	2707	2202	1,5302	7,1227
2,5	127,43	0,0010672	0,7185	535,4	2717	2182	1,6071	7,053
3,0	133,54	0,0010733	0,6073	561,4	2727	2164	1,672	6,992
3,5	138,88	0,0010786	0,5241	584,5	2732	2148	1,728	6,941
4,0	143,62	0,0010836	0,4624	604,7	2738	2133	1,777	6,897
4,5	147,92	0,0010883	0,4139	623,4	2744	2121	1,821	6,857
5,0	151,84	0,0010927	0,3747	640,1	2749	2109	1,860	6,822
5,5	155,47	0,0010969	0,3426	655,8	2753	2097	1,897	4,822
6,0	158,84	0,0011007	0,3156	670,5	2757	2086	1,931	6,761
6,5	161,99	0,0011046	0,29257	684,2	2759,9	2076	1,926	6,733
7,0	164,96	0,0011082	0,2727	697,1	2762,9	2066	1,992	6,707

Сухой насыщенный пар и вода на кривой насыщения (по температурам)

Таблица 2

t, °C	p, бар	t, °C	p, бар	t, °C	p, бар
1	2	3	4	5	6
0.01	0.006112	37	0.06274	74	0.3696
1	0,006566	38	0,06624	75	0,3855
2	0,007054	39	0,06991	76	0,4019
3	0,007575	40	0,07375	77	0,4189
4	0,008129	41	0,07777	78	0,4365
5	0,008719	42	0,08198	79	0,4547
6	0,009347	43	0,08639	80	0,4736
7	0,010013	44	0,09101	81	0,4931
8	0,010721	45	0,09584	82	0,5133
9	0,011473	46	0,10088	83	0,5342
10	0,012271	47	0,10614	84	0,5558
11	0,013118	48	0,11163	85	0,5781
12	0,014016	49	0,11736	86	0,6011
13	0,014967	50	0,12335	87	0,6249
14	0,015974	51	0,12960	88	0,6495
15	0,017041	52	0,13612	89	0,6749
16	0,018170	53	0,14292	90	0,7011
17	0,019364	54	0,15001	91	0,7281
18	0,02062	55	0,15740	92	0,7560
19	0,02196	56	0,16510	93	0,7848
20	0,02337	57	0,17312	94	0,8145
21	0,02486	58	0,18146	95	0,8451
22	0,02643	59	0,19014	96	0,8767
23	0,02808	60	0,19917	97	0,9093
24	0,02982	61	0,2086	98	0,9429
25	0,03166	62	0,2184	99	0,9775
26	0,03360	63	0,2285	100	1,01325
27	0,03564	64	0,2391	101	1,0499
28	0,03779	65	0,2501	102	1,0876
29	0,04004	66	0,2615	103	1,1265
30	0,04241	67	0,2733	104	1,1666
31	0,04491	68	0,2856	105	1,2079
32	0,04753	69	0,2984	106	1,2504
33	0,05029	70	0,3117	107	1,2941
34	0,05318	71	0,3254	108	1,3390
35	0,05622	72	0,3396	109	1,3852
36	0,05940	73	0,3543	110	1,4326
				120	1,9854
				130	2,7011

Физические свойства воды

Таблица 3

$t, ^\circ\text{C}$	$\text{Cp, кДж/(кг}\cdot\text{град)}$	$\lambda, \text{Вт/(м}\cdot\text{град)}$	$\nu\cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	$\beta\cdot 10^4, \text{1/град}$	$\text{Pr}$
0	4212	0,551	1,789	-0,63	13,67
10	4191	0,574	1,306	0,70	9,52
20	4183	0,599	1,006	1,82	7,02
30	4174	0,618	0,805	3,21	5,42
40	4174	0,635	0,659	3,87	4,31
50	4174	0,648	0,556	4,49	3,54
60	4179	0,659	0,478	5,11	2,98
70	4187	0,668	0,415	5,70	2,55
80	4195	0,674	0,365	6,32	2,21
90	4208	0,680	0,326	6,95	1,95
100	4220	0,683	0,295	7,52	1,75
110	4233	0,685	0,272	8,08	1,60
120	4250	0,686	0,252	8,64	1,47

Физические свойства сухого воздуха при  $B=760$  мм рт. ст.

Таблица 4

$t, ^\circ\text{C}$	$\text{Cp, кДж/(кг}\cdot\text{град)}$	$\lambda, \text{Вт/(м}\cdot\text{град)}$	$\lambda, \text{Вт/(м}\cdot\text{град)}$	$\beta\cdot 10^4, \text{1/град}$	$\text{Pr}$
0	1005	0,0244	13,28	36,6	0,707
10	1005	0,0251	14,16	35,3	0,705
20	1005	0,0259	15,06	34,1	0,703
30	1005	0,0267	16,00	33,0	0,701
40	1005	0,0276	16,96	31,9	0,699
50	1005	0,0283	17,95	30,9	0,698
60	1005	0,0290	18,97	30,0	0,696
70	1009	0,0296	20,02	29,1	0,694
80	1009	0,0305	21,09	28,3	0,692
90	1009	0,0313	22,10	27,5	0,690
100	1009	0,0321	23,13	26,8	0,688
120	1009	0,0334	25,45	25,4	0,686

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ  
ПО ДИСЦИПЛИНЕ «ТЕПЛОТЕХНИКА»

Составители: Людмила Николаевна Девочкина,  
Елена Евгеньевна Корочкина

Научный редактор Е.Н. Калинин  
Редактор В. В. Котикова

**Лицензия** ИД № 06309 от 19.11.2001. Подписано в печать от 18.01.2005.  
Формат 1/16 60\*84. Бумага писчая. Плоская печать.  
Усл. печ. л. 2,32. Уч.-изд.л.2,20. Тираж 150 экз. Заказ № 3995

Редакционно-издательский отдел  
Ивановской государственной текстильной академии  
Участок оперативной полиграфии 153000  
г.Иваново, пр.Ф.Энгельса,21