

Документ подписан простой электронной подписью  
Информация о владельце:  
ФИО: Емельянов Сергей Геннадьевич  
Должность: ректор  
Дата подписания: 25.09.2022 16:31:08  
Уникальный программный ключ:  
9ba7d3e34c012eba476ffd2d064cf2781953be730df2374d16f3c0ce536f0fc6

## МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Юго-Западный государственный университет»  
(ЮЗГУ)

Кафедра теплогазоводоснабжения



### ТЕПЛОМАСООБМЕН

Методические указания к лабораторным работам для студентов  
технических направлений подготовки очной и заочной форм  
обучения

Курск 2017 г.

УДК 536.2

Составители: В.А. Жмакин, Н.С. Кобелев, Е.М. Кувардина.

Рецензент

Доктор технических наук, профессор кафедры  
теплогазоводоснабжения В.С. Ежов

**Тепломассообмен:** методические указания к лабораторным работам для студентов технических направлений подготовки очной и заочной форм обучения / Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: В.А. Жмакин, Н.С. Кобелев, Е.М. Кувардина. – Курск, 2017. – 59 с.: ил. 23, табл. 11, прилож. 3. – Библиогр.: с. 56.

Приводятся методики выполнения лабораторных работ и вопросы для самоконтроля и к защите лабораторных работ по тепломассообмену, а также необходимый справочный материал в виде таблиц.

Методические указания предназначены для студентов технических направлений подготовки очной и заочной формы обучения.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать . Формат 60x84 1/16.  
Усл. печ.л. Уч. изд.л. Тираж 50 экз. Заказ . Бесплатно.  
Юго-Западный государственный университет.  
305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

## Содержание

Общие указания.....	4
Охрана труда и техника безопасности при выполнении лабораторных работ.....	5
Лабораторная работа 1.....	6
Лабораторная работа 2.....	25
Лабораторная работа 3.....	31
Лабораторная работа 4.....	38
Лабораторная работа 5.....	45
Библиографический список .....	56
Приложения.....	57

## ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ

Перед выполнением работ необходимо изучить основные теоретические положения, ознакомиться с лабораторными стендами, записать метрологические характеристики используемых средств измерений (в лабораторных работах 1, 2, 3 и 5 следует записать диапазон измерения, цену деления и допускаемую погрешность измерительных приборов, мерных стаканов и колб.

После завершения лабораторных работ каждый студент должен составить отчет, в котором приводятся основные теоретические положения, рисунок лабораторной установки, по результатам опытов следует выполнить расчеты и сопроводить их необходимыми пояснениями, дать оценку погрешности измерения каждого параметра, а численные значения погрешностей занести в таблицы для записи результатов измерений и расчетов. Отчет завершается аргументированным выводом. Методы оценки результатов измерений и расчетов приведены в описании работ.

Отчет представляется студентом при сдаче зачета по данной дисциплине. Отчет должен содержать:

1. Краткое описание работы.
2. Схему установки.
3. Протокол записи показаний измерительных приборов.
4. Обработку результатов опыта.
5. Ответы на контрольные вопросы.

## **ОХРАНА ТРУДА И ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ**

Организация безопасной работы при выполнении лабораторных работ по кафедре теплогазоводоснабжения производится в соответствии с требованиями ГОСТ 12.0.003-74. ССБТ "Опасные и вредные производственные факторы. Классификация", ГОСТ 12.1.004-85. ССБТ. "Пожарная безопасность. Общие требования", ГОСТ 12.1.005-76. ССБТ. "Воздух рабочей зоны. Общие санитарно-гигиенические требования", ГОСТ 12.1.010-76. ССБТ. "Взрывобезопасность. Общие требования", ГОСТ 12.1.019-79. ССБТ. "Электробезопасность. Общие требования".

К работе на лабораторных установках допускаются студенты, имеющие теоретическую подготовку по дисциплине, прошедшие инструктаж по технике безопасности и расписавшиеся в соответствующем журнале.

По окончании лабораторных работ необходимо привести в порядок рабочее место. Студенты, не выполняющие правила техники безопасности, отстраняются от проведения лабораторных работ.

## Лабораторная работа № 1.

### ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ И ИЗМЕРЕНИЯ

**Целью работы** является расширение и закрепление знаний по основным теплотехническим измерениям и приборам.

#### Задание

1. Изучить основные измерительные приборы в теплотехнике.
2. Составить отчёт по выполненной работе.

#### Краткие сведения о теплотехнических измерениях и приборах

Теплотехнические измерения сводятся к определению важных физических величин (температуры, давления, расхода, состава вещества и др.), необходимых для правильного ведения того или иного технологического процесса в промышленности.

Наиболее распространенные приборы:

1. Приборы для измерения температуры.
2. Приборы для измерения давления.
3. Приборы для измерения расхода жидкостей, газов и паров.

В зависимости от назначения и точности приборы в свою очередь делятся на образцовые, технические, лабораторные.

Образцовые - для проверки и градуирования приборов.

Технические - для измерения в промышленных условиях с классом точности 1,0; 1,5; 2,5; 4,0.

Лабораторные - для измерения в лабораторных условиях с классом точности 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0.

### 1. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ

Температура характеризует меру нагретости вещества (уровень его теплового состояния). Для её измерения используют зависимость свойств тел от температуры.

Температура измеряется термометрами и пирометрами.

Действие термометров основано на использовании свойств различных тел при изменении температуры изменять свой объем при постоянном давлении (термометры расширения), изменять давление при постоянном объеме (манометрические термометры)

или изменять электрическое сопротивление (термометры сопротивления), на использовании свойства металлов и сплавов создавать электродвижущую силу при нагреве спая разнородных металлов (термоэлектрические термометры или термопары). Действие пирометров основано на использовании законов излучения (пирометры излучения).

## 1.1. Термометры

### 1.1.1. Термометры расширения

К термометрам расширения относятся жидкостно-стеклянные, стержневые, биметаллические, манометрические.

Жидкостно-стеклянные термометры получили наибольшее распространение. Это стеклянная трубка с капилляром, заканчивающимся внизу резервуаром, заполненным рабочей жидкостью (рис.1.1).

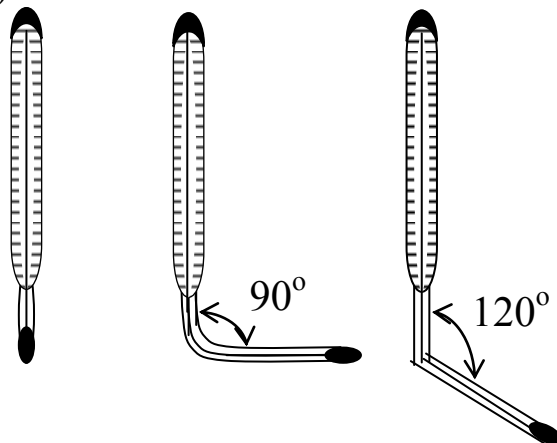


Рис.1.1. Термометры жидкостно-стеклянные

Ртутные термометры применяются для измерения температур от  $-35$  до  $\pm 650$  °С. Конечный предел измерения достигается путём искусственного повышения точки кипения ртути. С этой целью у термометров для измерения высоких температур пространство капилляра над ртутью, из которого предварительно удалён воздух, заполняется инертным газом (азотом) под давлением. Для  $600$  °С и выше трубки изготавливаются из кварца.

Ртутные термометры бывают с вложенной шкалой и палочные. По назначению ртутные термометры разделяются на промышленные, лабораторные и образцовые.

В зависимости от места установки термометров их хвостовая часть может быть прямая или изогнутая и иметь разную длину. При измерении температуры ртутным термометром необходимо учитывать поправку на температуру выступающего столбика ртути, так как при градуировке термометр полностью погружается в среду с постоянной температурой.

Спиртовые термометры применяются для измерения невысоких температур до  $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Достоинства: широкий интервал измерения температур, дешевизна, простота изготовления и применения, большая точность измерения.

Недостатками жидкостно-стеклянных термометров является их хрупкость, невозможность дистанционной передачи и автоматической записи показаний, большая инерционность, необходимость учета поправки на выступающий столбик ртути.

### Дилатометрические термометры

Принцип действия дилатометрических термометров основан на различии коэффициентов теплового расширения двух твердых тел.

Зависимость длины твердого тела от его температуры определяется выражением

$$l = l_0(1 + \alpha t), \quad (1.1)$$

где  $l_0$  – длина тела при температуре  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;

$\alpha$  – средний температурный коэффициент линейного расширения тела,  $\text{град}^{-1}$ .

Различают стержневые и пластинчатые (биметаллические) дилатометрические термометры.

Стержневой термометр имеет закрытую с одного конца трубку, изготовленную из материала с большим коэффициентом линейного расширения, которую помещают в измеряемую среду. В трубку вставлен стержень, изготовленный из материала с малым коэффициентом линейного расширения и жестко закрепленный с закрытым концом трубки. Другой конец стержня при помощи рычагов соединен со стрелкой или электрическим контактом. При изменении температуры трубка изменяет свою длину больше, чем стержень, за счет чего стержень перемещается и перемещает



связанную с ним рычагом стрелку или электрические контакты.

Пластинчатый термометр состоит из двух изогнутых и спаянных между собой по краям металлических полосок с различными коэффициентами линейного расширения. Внутренняя полоска имеет большой коэффициент линейного расширения, а внешняя - малый. Один конец пластинок жестко крепится к корпусу, а другой конец при помощи рычагов соединен со стрелкой.

При увеличении температуры пластинки изгибаются в сторону металла с меньшим коэффициентом линейного расширения.

Биметаллические термометры не получили распространения как самостоятельные приборы и используются, главным образом, в качестве чувствительных элементов (датчиков) в сигнализаторах температуры.

Манометрические термометры основаны на использовании зависимости давления жидкости, паров или газов, заключенных в замкнутом объеме, от температуры (рис. 1.2). Диапазон измеряемых температур составляет  $-130 + 550$  °С.

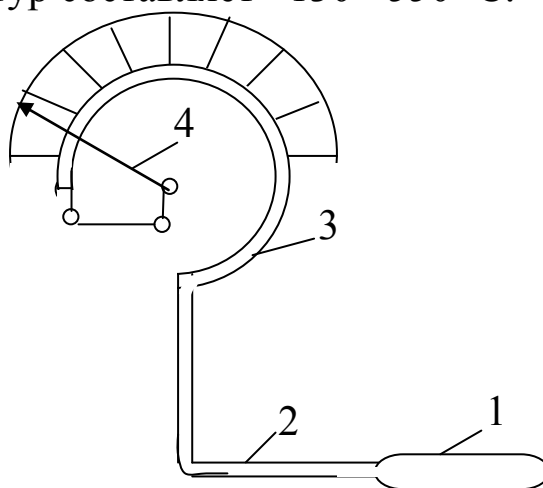


Рис.1.2. Схема манометрического термометра

Манометрический термометр состоит из термобаллона (1), погружаемого в измеряемую среду, капилляра (2) и трубчатой пружины Бурдона овального или эллиптического сечения (3). При нагревании термобаллона, внутри которого находится рабочее

вещество, пропорционально температуре повышается давление. Давление преобразуется манометрической пружиной в перемещение стрелки (4) указателя прибора.

Манометрические приборы, в зависимости от рабочего вещества, делятся на три типа: жидкостные (метилловый спирт, ртуть), паровые (бензол, хлор-этил, ацетон) и газовые (азот, гелий).

Достоинства: манометрические термометры могут быть снабжены сигнальными контактами, устройствами для дистанционной передачи показаний и устройствами для регистрации. Отсутствие электрических цепей позволяет применять их во взрывоопасной среде.

Недостатки: невысокая точность измерений, малая механическая прочность капиллярных трубок, инерционность, сложность ремонта и монтажа.

### **1.1.2. Термометры сопротивления**

Применяются в промышленности для измерения температур в пределах от  $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+650\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Принцип действия термометров сопротивления основан на свойствах вещества изменять свое электрическое сопротивление с изменением температуры. Зная зависимость сопротивления от температуры, можно по его измеренной величине судить о температуре измеряемой среды. В качестве материалов для изготовления термометров сопротивления применяют платину, медь и никель.

Особенно пригодной для термометра сопротивления является платина. Платиновый термометр сопротивления служит самым точным прибором для измерения температуры в лабораторных условиях. Во-первых, платину можно получить высокой степени чистоты, во-вторых, изменение сопротивления платины с изменением температуры в интервале от  $0$  до  $+630\text{ }^{\circ}\text{C}$  достаточно велико. Зависимость сопротивления платинового термометра  $R_t$  от температуры в интервале от  $0$  до  $+630\text{ }^{\circ}\text{C}$  выражается уравнением:

$$R_t = R_0(1 + At + Bt^2), \quad (1.2)$$

где  $R_t$  – сопротивление проволоки термометра при температуре  $t\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;

$R_0$  – сопротивление этой проволоки при температуре  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;

$A$  и  $B$  – постоянные термометра.

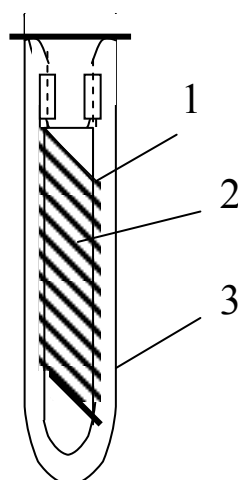


Рис. 1.3. Платиновый термометр

Конструкция платинового термометра сопротивления приведена на рис.1.3. Платиновая проволока, диаметром чаще всего 0,1 мм, свитая в спираль (1), уложена на кварцевом каркасе (2). К концам спирали припаяны выводы из платиновой проволоки – по два с каждого конца. Все это помещено в защитную кварцевую трубку (3).

Достоинства: широкий диапазон измерений, высокая точность и чувствительность, возможность дистанционной передачи и автоматической записи показаний, незначительная инерционность.

### 1.1.3. Термоэлектрические термометры (термопары)

Принцип действия термоэлектрического пирометра (термопары) основан на свойствах металлов и сплавов создавать термоэлектродвижущую силу (термо-э.д.с.) при нагревании спая двух разнородных проводников. Термопара представляет собой два разнородных проводника, составляющих общую электрическую цепь (рис.1.4). Если температура мест соединений (спаев) проводников  $t$  и  $t_0$  неодинакова, то возникает термо-э.д.с. и по цепи протекает ток. Величина ЭДС однозначно зависит от разности температур  $t$  и  $t_0$ , поэтому по величине термо-э.д.с. термопары судят о температуре.

Горячий спай термопары (1) помещают в среду, температуру которой нужно измерить, а холодный спай (3) соединяют с электроизмерительным прибором (рис.1.5). Обычно градуировка термопар производится при температуре холодных спаев

термопары, равной  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . По результатам градуировки составляются градуировочные кривые  $t=E(t,t_0)$  или таблицы (табл.1.1). Если при измерении температуры среды, имеющей  $t\text{ }^{\circ}\text{C}$ , температура холодных спаев отличается от  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  и равна  $t_0$ , то значение термо-э.д.с.  $E(t,0)$ , по которому находят искомое значение температуры  $t$ , определяется по формуле:

$$E(t,0)=E(t,t_0)+E(t_0,0), \quad (1.3)$$

где  $E(t,t_0)$  - показание милливольтметра, mV;  
 $E(t_0,0)$  - поправка на температуру холодного спая, которая находится по градуировочной кривой или табл.1.1 по температуре  $t$ , равной  $t_0\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

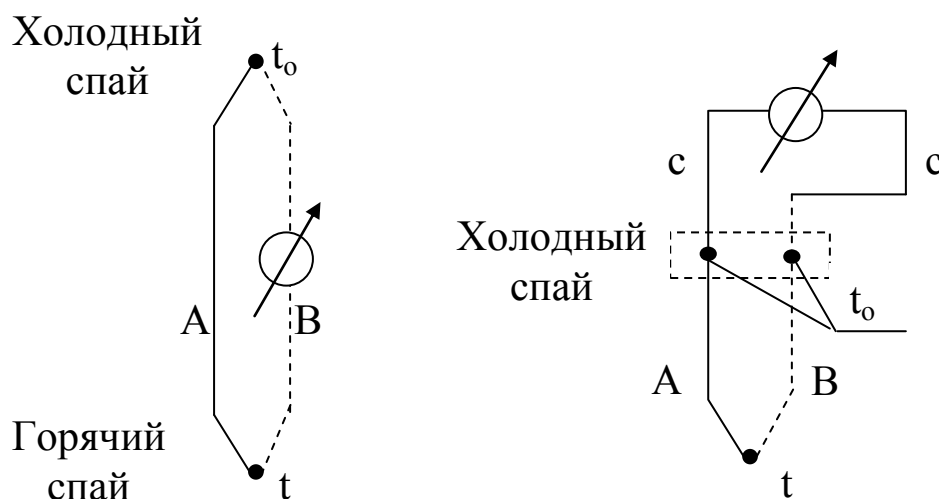


Рис.1.4. Схемы термоэлектрических цепей

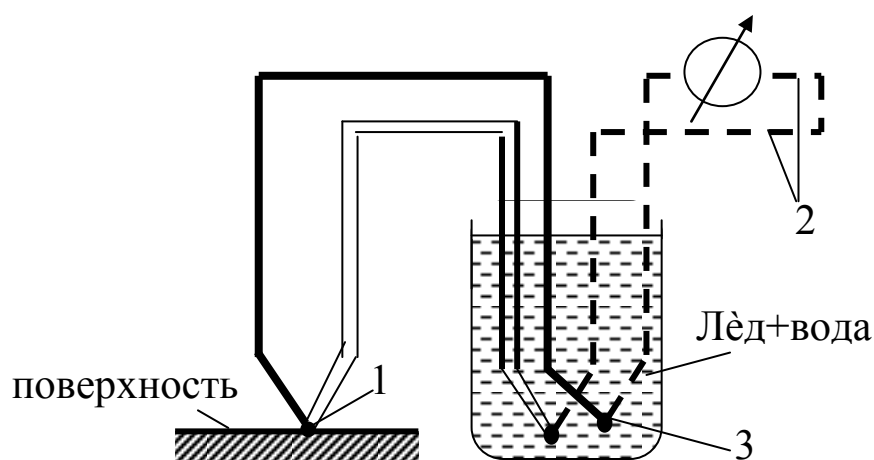


Рис.1.5. Схема подключения термопары к измерительному прибору 1-горячий спай; 2- медные провода; 3-холодный спай

Для изготовления термопар применяют целый ряд материалов: платина-платинородий, хромель-алюмель, хромель-копель, железо-константан, медь-константан, вольфрам, молибден и другие материалы.

Таблица 1.1 – Градуировочная таблица термопары хромель-алюмель при температуре холодного спая 0 °С

t, °С	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	термо-э.д.с.									
0	0	0,04	0,08	0,12	0,16	0,20	0,24	0,28	0,32	0,36
10	0,40	0,44	0,48	0,52	0,56	0,60	0,64	0,68	0,72	0,76
20	0,80	0,84	0,88	0,92	0,96	1,00	1,04	1,08	0,12	0,16
30	1,20	1,24	1,28	1,32	1,36	1,41	1,45	1,49	1,53	1,57
40	1,61	1,65	1,69	1,73	1,77	1,82	1,86	1,90	1,94	1,98
50	2,02	2,06	2,10	2,14	2,18	2,23	2,27	2,31	2,35	2,39
60	2,43	2,47	2,51	2,56	2,60	2,64	2,68	2,72	2,77	2,81
70	2,85	2,89	2,93	2,97	3,01	3,06	3,10	3,14	3,18	3,22
80	3,26	3,30	3,34	3,39	3,43	3,47	3,51	3,55	3,60	3,64
90	3,68	3,72	3,76	3,81	3,85	3,89	3,93	3,97	4,02	4,06
100	4,10	4,14	4,18	4,22	4,26	4,31	4,35	4,39	4,43	4,47

Пределы измерения температур стандартными термопарами представлены в табл. 1.2.

Таблица 1.2 - Характеристика стандартных термопар

Наименование термопары	Тип	Термо-э.д.с. t <sub>0</sub> =0°С, t=100°С	Верхний предел, °С	
			при длительном применении	при кратковременном применении
Платинородий (90%Pt+10%Rt)-платина	ТПП	1,04	1300	1600
Хромель (90%Ni+10%Cr <sub>2</sub> )-алюмель (95%Ni+5%Al)	ТХА	4,10	1000	1300
Хромель-копель (56%Cu+44%Ni)	ТХК	6,95	600	800

В качестве вторичного прибора для измерения термо-э.д.с. применяются чувствительные электроизмерительные приборы: милливольтметры, потенциометры и др.

Достоинством термоэлектрических пирометров является широкий диапазон измерений, достаточно высокая точность, возможность дистанционной передачи и автоматической записи показаний, высокая чувствительность, незначительная тепловая инерционность, возможность измерения температуры в точке поверхности или объёма.

#### **1.1.4. Пирометры (бесконтактные термометры)**

Пирометры применяются для измерения температуры тел в диапазоне от  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+6000\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Действие этих приборов основано на зависимости теплового излучения нагретых тел от их температуры и физико-химических свойств. В отличие от термометров первичный преобразователь пирометра не подвергается влиянию высокой температуры и не искажает температурного поля, так как находится вне измеряемой среды.

Ручные пирометры пистолетного типа измеряют температуры в диапазоне от  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+3000\text{ }^{\circ}\text{C}$  с различными возможностями, повышающими удобство использования. Большинство моделей оснащается лазерной или оптической системой наведения на цель.

Стационарные пирометры могут быть выполнены в герметичном корпусе и с водяным охлаждением, с аналоговым или цифровым выходом, что позволяет включить их в технологическую цепь ( и вместо термопар).

## **2. ИЗМЕРЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ**

Давлением называется сила, приходящаяся на единицу поверхности и направленная перпендикулярно к ней.

В Международной системе единиц (СИ) сила измеряется в Ньютонах, поверхность - в  $\text{м}^2$ , единицей измерения давления является Паскаль (Па),  $\text{Н}/\text{м}^2$ . Кратными единицами давления являются:

$$1\text{ кН}/\text{м}^2 = 10^3\text{ Н}/\text{м}^2 = 1\text{ кПа};$$

$$1\text{ МН}/\text{м}^2 = 10^6\text{ Н}/\text{м}^2 = 1\text{ МПа}.$$

Для практических измерений в системе СИ применяется бар. При этом  $1\text{ бар} = 10^5\text{ Н}/\text{м}^2 = 10^5\text{ Па}$ .

Единицей измерения давления в системе МК ГСС является  $1 \text{ кгс/м}^2$  ( $1 \text{ кГ/см}^2$ ) - техническая атмосфера.

Давление часто измеряют высотой столба жидкости. Для определения давления, определяемого столбом жидкости, используют формулу:

$$p = \rho gh, \quad (1.4)$$

где  $p$  - давление,  $\text{Н/м}^2$ ;

$h$  - высота столба жидкости, м;

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

$g$  - ускорение силы тяжести в точке измерения,  $\text{м/с}^2$ .

При измерении давления различают абсолютное давление, атмосферное давление, избыточное давление и разрежение.

Абсолютное давление - это полное давление, под которым находится пар, жидкость или газ. Обозначается ( $p$ ). Абсолютное давление является параметром состояния.

Атмосферное давление - это давление окружающего нас воздуха. Обозначается  $P_6$  или  $B$  (барометрическое). Атмосферное давление, равное давлению на горизонтальную плоскость столба ртути высотой 760 мм при  $0^\circ\text{C}$  и ускорении силы тяжести  $9,80665 \text{ м/с}^2$ , называется физической атмосферой (атм).

Избыточное давление - это разность между абсолютным давлением ( $P$ ) и барометрическим ( $P_6$ ), т.е.  $P_M = P - P_6$ . Измеряется эта разность манометром, поэтому называется манометрической ( $P_M$ ), таким образом,  $P = P_6 + P_M$ .

Разрежение равно разности между атмосферным давлением и абсолютным, т.е.

$$P_B = P_6 - P. \quad (1.5)$$

Эта разность давлений измеряется вакуумметром и называется вакуумом (или разрежением), т.е.  $P = P_6 - P_B$ .

### Связь между единицами давления

$1 \text{ техн. атмосфера} = 1 \text{ кГ/см}^2 = 10^4 \text{ кГ/м}^2 = 10 \text{ м вод.ст.} =$   
 $= 10^4 \text{ мм вод.ст.} = 735,6 \text{ мм рт.ст.} = 0,981 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2 \text{ (Па)} = 0,981 \text{ бар.}$

$1 \text{ физ.атмосфера} = 760 \text{ мм рт.ст.} = 1,033 \text{ кГ/см}^2 = 10330 \text{ кГ/м}^2$   
 $= 10,333 \text{ м вод.ст.} = 10333 \text{ мм вод.ст.} = 1,01325 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2 = 1,01325 \text{ бар.}$

$1 \text{ бар} = 10^5 \text{ Н/м}^2 = 750 \text{ мм рт.ст.}$

$1 \text{ кГ/м}^2 = 9,81 \text{ Н/м}^2 = 1,0 \text{ мм вод.ст.} \quad 1 \text{ мм рт.ст.} = 133,33 \text{ Па.}$

Приборами для измерения избыточного давления служат

манометры, для измерения избыточного давления или разрежения – мановакуумметры, для измерения разрежения – вакуумметры и для измерения разности (перепада) давлений – дифференциальные манометры.

Приборы для измерения давления можно классифицировать по различным признакам.

По принципу действия приборы для измерения давления разделяются на:

1). жидкостные, в которых измеряемое давление уравнивается давлением столба жидкости соответствующей высоты.

2). пружинные, в которых для определения давления измеряется возникающая под действием измеряемого давления деформация различного рода упругих элементов: трубчатой пружины, мембраны и др.

3) поршневые, в которых измеряемое давление определяется нагрузкой на поршень, перемещаемый в цилиндре, заполненном маслом, и другие типы.

## 2.1. Жидкостные манометры и вакуумметры

С помощью жидкостных приборов производят измерение небольших давлений (не более  $2 \text{ кГ/см}^2$ ) и разрежений.

### 2.1.1. U-образный манометр (вакуумметр)

Манометр состоит из U-образной трубки (рис.1.6) со шкалой.

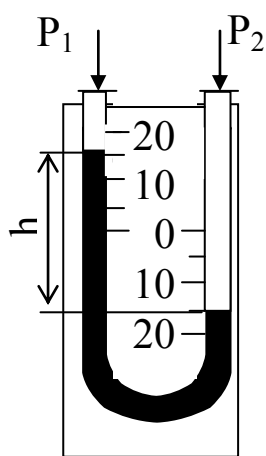


Рис.1.6. U-образный жидкостный манометр

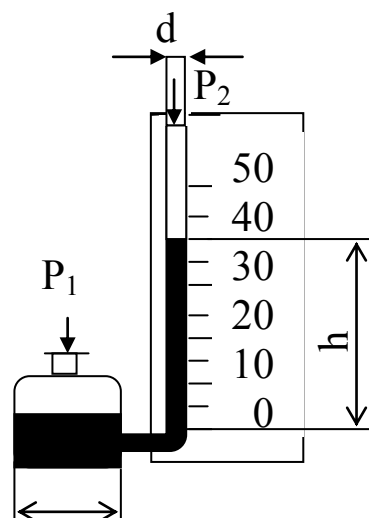


Рис.1.7. Чашечный жидкостный манометр



Трубка заполняется рабочей жидкостью (вода, ртуть, глицерин и др.) до нулевой отметки шкалы. Одно колено стеклянной трубки соединяется резиновым шлангом с измеряемой средой, другое соединено непосредственно с атмосферой.

Перепад давлений определяется разностью уровней  $h$  рабочей жидкости, мм ст. жидкости, т.е.:

$$h = P_1 - P_2 \quad (1.6)$$

U-образные мановакуумметры используются для измерения избыточного давления и вакуума.

Разновидностью U-образного манометра является чашечный манометр, у которого одна трубка заменена чашкой (рис.1.7). Измеряемое давление на поверхности жидкости в чашке заставляет рабочую жидкость подниматься по измерительной трубке. Если величина отношения  $D^2/d^2 > 400$ , то измеряемое давление будет определяться высотой рабочей жидкости  $h$ , измеренной от нулевого деления шкалы, без каких-либо поправок на изменение уровня рабочей жидкости в широком сосуде:  $P_m = h$ .

Погрешность измерения чашечными манометрами выше, чем U-образными, зато большим удобством является измерение уровня жидкости в одной трубке.

### 2.1.2. Микроманометры

Для измерения очень малых давлений или разрежений, определяемых несколькими мм водного столба, предназначены микроманометры с наклонной трубкой (рис.1.8). Давление, определяемое наклонным микроманометром, вычисляется по формуле:

$$P = \ell \cdot \sin \alpha, \quad (1.7)$$

где  $P$  - давление, мм столба жидкости;

$\ell$  - длина столба рабочей жидкости в наклонной трубке, мм;

$\alpha$  - угол наклона трубки к горизонтали.

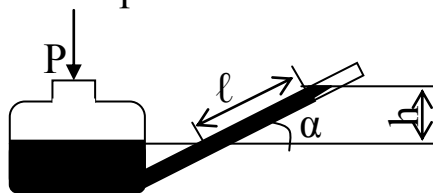


Рис.1.8. Схема микроманометра с наклонной трубкой

Микроманометры изготавливаются для измерения давлений с верхними пределами шкалы 15-150 мм вод.ст., с углом наклона трубки 20-50°.

Для точных измерений небольших давлений газа находит применение многопредельный жидкостной микроманометр с наклонной трубкой типа ММН-240. Посредством дугообразной стойки с отверстиями шкала с измерительной трубкой может быть закреплена под пятью углами наклона к горизонтали.

Если в прибор залит спирт ( $\rho = 809,5 \text{ кг/м}^3$ ), то истинное значение величины измеряемого давления определяется по формуле:

$$P_m = \ell \cdot g \cdot K, \text{ Н/м}^2, \quad (1.8)$$

где  $\ell$  - отсчет по шкале микроманометра, мм;

$g = 9,81 \text{ м/с}^2$  - ускорение силы тяжести;

$K = 0,2; 0,3; 0,4; 0,6; 0,8$  - постоянная прибора.

Все указанные выше жидкостные приборы находят широкое применение в лабораторной практике и при испытаниях. Это объясняется простотой их изготовления и обращения с ними, дешевизной, относительно высокой точностью измерения.

На точность измерения давления при помощи жидкостных манометров оказывает влияние правильность установки прибора и правильность отсчета уровня жидкости.

## **2.2. Пружинные манометры и вакуумметры**

Принцип действия этих приборов основан на деформации различного рода упругих элементов: трубчатых пружин, мембран, сильфонов.

Пружинные манометры применяются для измерения давлений от 0,001 МПа до 1000 МПа.

### **2.2.1. Манометры с трубчатой пружиной**

Рабочей частью манометра (рис.1.9) служит изогнутая стальная или латунная трубка (трубчатая пружина). Одним концом она впаяна в штуцер, которым манометр присоединяется к сосуду, где требуется измерить давление. Трубка I имеет овальное сечение и при повышении давления разгибается. Другой конец трубки связан передаточным механизмом 3 со стрелкой 4, которая

поворачивается вокруг своей оси при повышении давления. Угол поворота стрелки зависит от величины давления. Вакуумметры и мановакуумметры устроены аналогично манометру.

Достоинства: большой диапазон измерений, возможность автоматической записи и дистанционной передачи показаний, простота и надёжность конструкции.

Недостатки: потеря чувствительным элементом упругих свойств с течением времени.

### 2.2.2. Мембранные манометры

В мембранных манометрах упругим элементом является мембрана (рис.1.10). Мембранные приборы нашли широкое применение при измерении низких давлений и разрежений, в тягомерах и напоромерах.

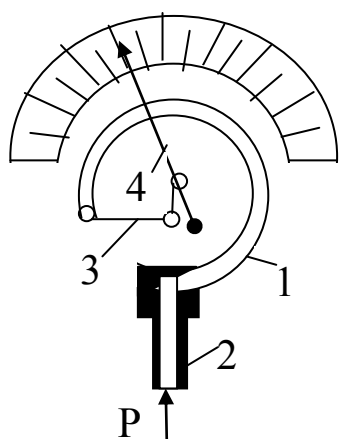


Рис.1.9. Манометр с трубчатой пружиной

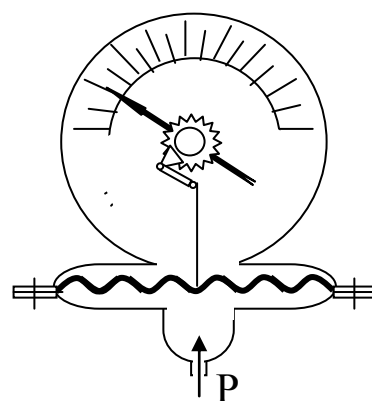


Рис.1.10. Схема мембранного манометра

### 2.2.3. Дифференциальные манометры

Дифференциальные манометры применяются для измерения разности давлений, т.е. перепада давлений. В качестве дифманометра могут быть использованы U-образные жидкостные манометры, трубчатые и мембранные манометры.

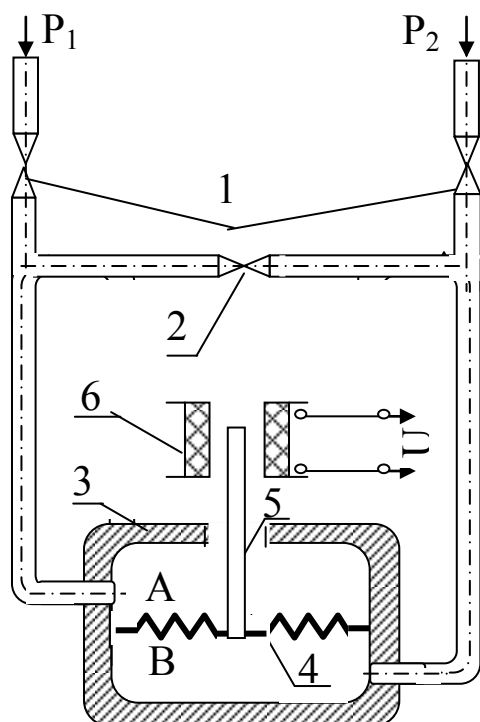


Рис.1.11. Дифференциальный мембранный манометр

Дифференциальный трубчатый манометр имеет в корпусе прибора две независимо действующие трубчатые пружины одинакового диаметра. Одним концом пружины впаяны в общий держатель с двумя ниппелями для присоединения к двум источникам измеряемого давления. Другим концом каждая из пружин связана с самостоятельным секторным механизмом.

Чувствительным элементом дифференциального мембранного манометра (рис.1.11) является мембрана. В зависимости от перепада давлений мембрана прогибается в ту или другую сторону. Большим преимуществом мембранного дифманометра

является то, что он выдерживает практически любые перегрузки.

При открытых вентилях 1 и закрытом уравнивающем вентиле 2 в камерах А и В корпуса 3, разделенных упругой мембраной 4

(из бронзы или нержавеющей стали), создаются давления  $P_1$  и  $P_2$  соответственно. Если давления  $P_1$  и  $P_2$  неодинаковы, то мембрана под действием сил давления деформируется, заставляя вертикально перемещаться шток 5, являющийся сердечником электромагнита 6.

Индуктивность катушки при этом изменяется, и эти изменения регистрируются на шкале вторичного электронного регистратора.

### 2.3. Поршневые манометры

Поршневые манометры предназначены для градуировки и поверки различных видов пружинных манометров, т.к. обладают высокой чувствительностью и точностью. По точности они приближаются к жидкостным манометрам. Для непосредственных замеров поршневые манометры употребляются редко (рис. 1.12).

Рабочими частями поршневого манометра являются цилиндр 1 и поршень 2 с тарелкой 3, на которую может быть положен груз 4. Поршень хорошо пригнан к цилиндру. Под поршень манометра залито масло. Площадь поршня точно равна  $1 \text{ см}^2$ , поэтому каждый кг груза, положенный на тарелку манометра, создает давление масла в  $1 \text{ кг/см}^2$ .

Сам поршень с тарелкой весит точно 1 кг. Давление, создаваемое прессом, передается через штуцер к присоединенным проверяемым приборам и уравнивается давлением поршня, которое определяется весом поршня, тарелки и находящихся на ней грузов. При помощи этого манометра можно измерить давление до  $60 \text{ кг/см}^2$ .

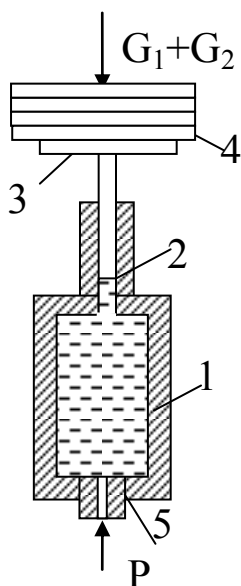


Рис 1.12 .Схема грузопоршневого манометра

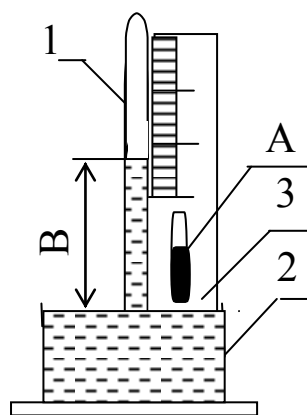


Рис.1.13. Схема ртутного чашечного

## 2.4. Барометры

Барометры служат для измерения атмосферного давления. По конструктивному оформлению барометры разделяются на ртутные и пружинные.

Ртутный чашечный барометр приведен на рис.1.13. Действие прибора основано на уравнивании давления атмосферы давлением ртутного столба, заключенного в барометрической

трубке. Чашечный барометр состоит из стеклянной трубки 1, чашки 2, металлической оправы 3, нониуса с механизмом перемещения, коррекционного термометра А и колпачка с кольцом для подвеса.

Пружинный барометр-анероид состоит из металлической гофрированной коробки, находящейся под вакуумом и реагирующей на изменение атмосферного давления; передаточного механизма; показывающей части, состоящей из стрелки, отмечающей изменение атмосферного давления на шкале прибора; дугообразного ртутного термометра.

### **3. ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ И РАСХОДА ЖИДКОСТЕЙ, ГАЗОВ И ПАРОВ**

Приборы для измерения расхода разделяются на 2 большие группы:

1 - приборы, измеряющие суммарный объём или массу вещества, протекающего по трубопроводу, называются счётчиками количества.

2 - приборы, измеряющие расход вещества, протекающего по трубопроводу в единицу времени, называются расходомерами.

Счётчики количества газов и жидкостей изготавливаются в основном в качестве приборов местного контроля и применяются, главным образом, для учёта и хозяйственных расчетов (например, газовые счётчики, водяные счётчики и др).

#### **3.1. Пневмометрические трубки**

Пневмометрические трубки представляют собой устройство, позволяющее измерить полный напор,  $P_{\text{п}}$  (динамический напор + статический напор) и статический напор в какой-либо точке потока,  $P_{\text{ст}}$ . Схема замера динамического напора пневмометрической трубкой приведена на рис. 1.14.

Пневмометрические трубки применяются всегда в комплексе с дифманометром. Дифманометр измеряет в единицах давления разность напоров полного и статического, т.е.  $P_{\text{д}} = P_{\text{п}} - P_{\text{ст}}$ .

Динамическое давление,  $P_{\text{д}}$ , связано со скоростью соотношением, вытекающим из уравнения Бернулли

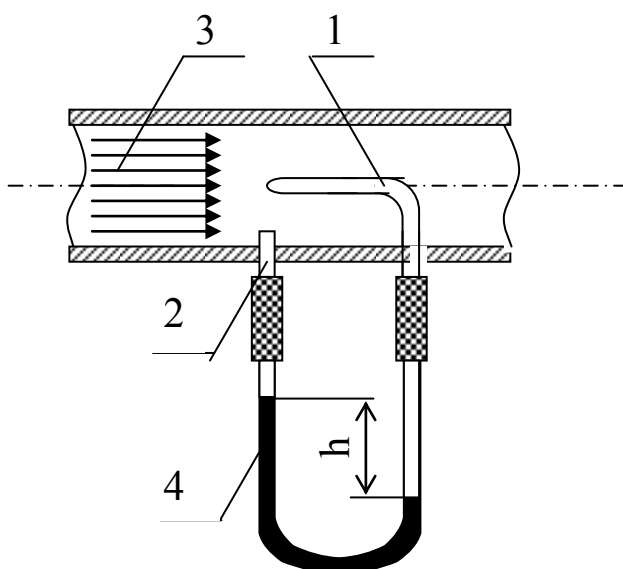


Рис.1.14. Схема замера

динамического давления

1- трубка полного давления;

2- трубка для отбора  
статического напора;

3- измеряемый поток;

4- U-образный манометр

дифманометре и вещества, находящегося над рабочей жидкостью, кг/м<sup>3</sup>, то:

$$w = \sqrt{\frac{2g}{\rho} h(\rho_{ж} - \rho_{г})} . \quad (1.12)$$

### 3.2. Дроссельные приборы

Дроссельные приборы основаны на замере перепада давлений в дроссельных устройствах, устанавливаемых в трубопроводе.

Дроссельное устройство создает местное сужение, которое вызывает перепад давлений. Перепад давлений зависит от скорости потока, в связи с чем по перепаду давлений можно определить скорость и расход жидкости. В качестве дроссельных устройств применяют расходомерные диафрагмы и сопла.

Дроссельные приборы рассчитываются по определенным правилам. Перепад давлений в дроссельных устройствах замеряется дифманометрами.

$$P_{д} = P_{п} - P_{ст} = \frac{\rho w^2}{2g}, \quad (1.9)$$

где  $w$  - скорость движения среды, м/с;

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

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

$P_{д}$  - динамическое давление, кг/м<sup>2</sup>.

Отсюда скорость потока

$$w = \sqrt{\frac{2g}{\rho} (P_{п} - P_{ст})} \text{ м/с.} \quad (1.10)$$

Т.к. разность давлений: 1

$$P_{п} - P_{ст} = h(\rho_{ж} - \rho_{г}), \quad (1.11)$$

где  $h$  - перепад, разница уровней жидкости в коленах дифманометра;

$\rho_{ж} - \rho_{г}$  - соответственно плотности рабочей жидкости в

Дроссельные устройства называют приборами переменного перепада.

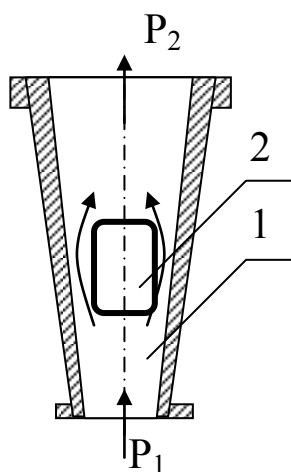


Рис.1.15. Ротаметр

Есть приборы постоянного перепада - ротаметры (рис. 1.15). Ротаметр состоит из вертикальной стеклянной конусной трубы 1, расширяющейся вверх. Внутри трубы находится поплавок 2, свободно плавающий в потоке измеряемой жидкости или газа. Шкала прибора выполняется с равномерными делениями и нанесена непосредственно на стеклянной трубке. Прибор устанавливается только в вертикальном положении при движении измеряемого потока снизу вверх.

При протекании измеряемого вещества внутри трубы прибора поплавков под воздействием протекающего потока поднимается до тех пор, пока кольцевой зазор между поплавком и внутренней поверхностью конусной трубы не увеличивается настолько, что подъемная сила, действующая на поплавок, уравнивается весом поплавка. Положение верхней грани поплавка указывает по шкале прибора величину расхода.

Перечисленные в данной работе приборы для измерения температуры, давления и расхода далеко не исчерпывают список основных теплотехнических приборов. Более подробно о приборах изложено в [1,3].

### Контрольные вопросы

1. Какие измерительные приборы используются в теплотехнике? Какие основные параметры рабочих тел контролируются?
2. Как классифицируются измерительные приборы в зависимости от назначения и точности?
3. Какие приборы для измерения температуры вы знаете?
4. Опишите конструкцию одного из измерительных приборов-термометров, принцип его действия, область применения, достоинства и недостатки.
5. Какие приборы для измерения давления вы знаете?



6. Опишите конструкцию одного из приборов для измерения давления, принцип его действия, область применения, достоинства и недостатки.

7. Какие приборы для измерения расхода жидкости или газа вы знаете?

8. Опишите конструкцию одного из приборов для измерения расхода, принцип его действия, область применения, достоинства и недостатки.

### **Лабораторная работа № 2.**

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

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

### **Задание**

1. Найти значение коэффициента теплопроводности исследуемого материала опытным путём.

2. Составить отчет по выполненной лабораторной работе.

### **Теоретическая часть**

Теплопроводность – это процесс распространения тепла при непосредственном соприкосновении частиц с различной температурой. В чистом виде этот процесс возможен лишь в однородных твердых телах. Теплообмен между отдельными частями тела объясняется взаимным обменом кинетической энергии через молекулярные связи, распространением упругих волн, а в металлах – диффузией свободных электронов.

Передача теплоты теплопроводностью связана с наличием разности температур.

Совокупность значений температур во всех точках тела называют температурным полем. Температура в теле может изменяться в направлении одной, двух и трех координатных осей. В соответствии с этим температурное поле называется одно-, двух-

и трехмерным. Если температурное поле меняется во времени, то оно называется неустановившимся или нестационарным  $t=f(x,y,z,\tau)$ , если же не меняется, то – установившимся или стационарным  $t = f(x,y,z)$ .

Поверхность, объединяющая точки равной температуры, называется изотермической. Температура в теле изменяется лишь в направлении, пересекающем изотермические поверхности. Наибольшее изменение температуры будет наблюдаться в направлении нормали  $n$  к изотермическим поверхностям.

Предел отношения изменения температуры  $\Delta t$  на единицу расстояния по нормали  $\Delta n$  между изотермическими поверхностями называется температурным градиентом, т.е.

$$\lim_{\Delta n \rightarrow 0} \Delta t / \Delta n = \partial t / \partial n = \text{grad} \cdot t, \text{ К/м.} \quad (2.1)$$

Температурный градиент является вектором, направленным по нормали к изотермической поверхности в сторону возрастания температуры.

Количество теплоты, переносимое через какую-либо изотермическую поверхность в единицу времени, называется тепловым потоком  $Q$ , Вт. Тепловой поток, отнесенный к единице площади изотермической поверхности, называется плотностью теплового потока или удельным тепловым потоком  $q$ , Вт/м<sup>2</sup>:

$$q = Q/F. \quad (2.2)$$

Величины  $Q$  и  $q$  являются векторами, направление которых противоположно направлению вектора температурного градиента.

В процессе теплопроводности количество переданного тепла в единицу времени пропорционально температурному градиенту и площади сечения  $F$ , перпендикулярного направлению распространения тепла, то есть

$$Q = -\lambda \cdot \frac{dt}{dn} F, \text{ Вт,} \quad (2.3)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К), который представляет собой количество теплоты, проходящее в единицу времени через единицу площади изотермической поверхности при температурном градиенте, равном единице. Коэффициент

теплопроводности характеризует способность тела проводить тепло.

Для многих материалов достаточно точно зависимость  $\lambda$  от  $t$  описывается формулой  $\lambda = \lambda_0 [1 + b \cdot t]$ , где  $\lambda_0$  – значение коэффициента теплопроводности при температуре  $t_0$ ;  $b$  – постоянная, определяемая опытным путем.

Уравнение (2.3) является математическим выражением основного закона теплопроводности – закона Фурье.

Для однородной цилиндрической стенки (трубы) длиной  $\ell$  с внутренним диаметром  $d_1$  и внешним диаметром  $d_2$  уравнение (2.3) имеет вид:

$$Q = -\lambda \cdot \frac{dt}{dr} F = -\lambda \cdot \frac{dt}{dr} 2\pi \cdot r \cdot \ell, \quad (2.4)$$

где  $dt/dr$  – температурный градиент,  $^{\circ}\text{C}/\text{м}$ ;

$r$  – радиус кольцевого слоя толщиной  $dr$ , м;

$F = 2\pi r \ell$  – площадь боковой поверхности цилиндра радиусом  $r$  и длиной  $\ell$ ,  $\text{м}^2$ .

При интегрировании уравнения (3) получаем следующую расчетную формулу:

$$Q = 2\pi \cdot \ell \cdot (t_{w1} - t_{w2}) / \ln(d_2/d_1), \text{ Вт}, \quad (2.5)$$

где  $t_{w1}$  и  $t_{w2}$  – температуры внутренней и наружной поверхностей трубы.

### Описание опытной установки

Эксперимент по определению  $\lambda$  проводится методом «цилиндра» на установке, принципиальная схема которой дана на рис. 2.1.

Материал, коэффициент теплопроводности которого определяется, засыпается в пространство между трубами 1 и 2. Нагрев материала осуществляется электрическим током, проходящим через нагреватель 3. Мощность, потребляемая нагревателем, регулируется лабораторным автотрансформатором 4 и измеряется ваттметром 5. Температуры исследуемого материала измеряются термопарами, спаи которых заложены на внутренней и наружной поверхности исследуемого слоя.

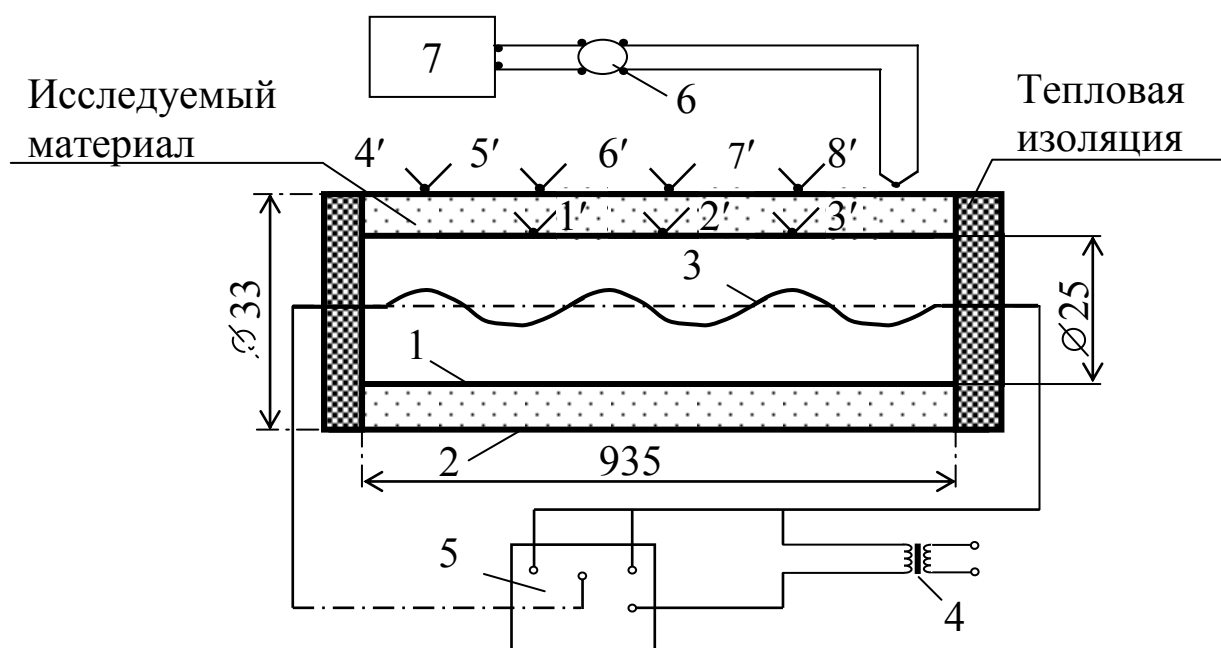


Рис.2.1. Принципиальная схема экспериментальной установки:  
 1 – внутренняя латунная труба; 2 – наружная латунная труба;  
 3 – электрический нагреватель; 4 – ЛАТР; 5 – ваттметр; 6 – переключатель термопар; 7 – потенциометр; 1'-8' – спаи хромель-копелевых термопар

Слой исследуемого сыпучего материала (песок) прилегает к поверхности трубы, поэтому термопары, которыми определяется температура внутренней поверхности слоя, заделываются по поверхности трубы 1, а термопары, которыми определяется температура внешней поверхности слоя исследуемого материала, заделываются на внутренней поверхности трубы 2. В действительности выполнить эту операцию не представляется возможным, поэтому термопары 4',5',6',7',8' заделываются на внешней стороне трубы 2. Перепадом температур в стенке пренебрегли, так как металл обладает хорошей теплопроводностью.

Ввиду того что на концевых участках трубы выделяющееся тепло проходит через слой материала не только в направлении, перпендикулярном к поверхности трубы, но и вдоль оси трубы вследствие утечки тепла через торцы трубы, рабочим участком считается средняя часть трубы и температуры в т. 4'-8' служат для контроля утечки тепла.

Все термопары при помощи переключателя 6 поочередно подключаются к потенциометру 7, по шкале которого проводится отсчёт ЭДС термопар в mV.

### Проведение опыта

После изучения описания и ознакомления с опытной установкой необходимо заготовить форму протокола для записи наблюдений.

Таблица 2.1 – Протокол испытаний

Мощность электронагревателя $Q=$ Вт; $t_0=$ °C; $E_0=$ mV								
Номера термопар	1'	2'	3'	4'	5'	6'	7'	8'
ЭДС термопар $E_i$ :								
1 замер								
2 замер								
Среднее значение $E_{icp}$ , mV								
$E=E_0+E_{icp}$ , mV								
Среднее значение температура-туры $t$ , °C								

С участием преподавателя или лаборанта при помощи автотрансформатора 4 устанавливается режим нагрева (30-50 Вт). Установив мощность нагревателя, необходимо следить за тем, чтобы она оставалась неизменной в течение всего опыта. При наступлении стационарного режима выполнить 2 замера показаний термопар с интервалом между замерами 1-2 мин. Выключение установки производится преподавателем или лаборантом.

### Обработка результатов опыта

Перевод  $E_i$  в градусы следует выполнить следующим образом: по градуировочной таблице 2.2 находим значение ЭДС  $E_0$ , соответствующее температуре окружающей среды  $t_0$ . Величину  $E_0$  складываем с ЭДС, измеренной потенциометром  $E_i$ , т.е. находим  $E=E_i+E_0$ . После этого по величине  $E$  по градуировочной таблице 2 находим измеряемую температуру  $t$ .

Коэффициент теплопроводности исследуемого материала находится из формулы (2.5):

$$\lambda = [Q \cdot \ln(d_2/d_1)] / [2\pi \cdot \ell \cdot (t_{w1} - t_{w2})], \quad (2.6)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности исследуемого материала, Вт/(м·К);

$Q$  – мощность электрического нагревателя, Вт;

$\ell$  – длина трубки, м;

$d_1$  и  $d_2$  – внутренний и наружный диаметры изоляционного слоя, м;

$t_{w1}$  и  $t_{w2}$  – средние температуры на внутренней и наружной поверхности изоляционного слоя испытуемого материала, °С.

Температуры  $t_{w1}$  и  $t_{w2}$  определяются как средние арифметические из показаний термопар 1', 2', 3' и 5', 6', 7', т.е.

$$t_{w1} = (t_1 + t_2 + t_3) / 3, \quad t_{w2} = (t_5 + t_6 + t_7) / 3. \quad (2.7)$$

Полученное значение  $\lambda$  следует отнести к средней температуре исследуемого материала

$$t = 0,5 \cdot (t_{w1} + t_{w2}). \quad (2.8)$$

Таблица 2.2 – Термо-ЭДС термоэлектрических термометров типа хромель-копель при температуре холодного спая 0 °С

Температура, °С	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	mV									
0	0,00	0,07	0,13	0,20	0,26	0,33	0,39	0,46	0,52	0,59
10	0,65	0,72	0,78	0,85	0,91	0,98	1,03	1,11	1,18	1,24
20	1,31	1,38	1,44	1,51	1,57	1,64	1,70	1,77	1,84	1,91
30	1,98	2,05	2,12	2,18	2,25	2,32	2,38	2,42	2,52	2,59
40	2,66	2,73	2,80	2,87	2,94	3,00	3,07	3,14	3,21	3,28
50	3,35	3,42	3,49	3,56	3,63	3,70	3,77	3,84	3,91	3,98
60	4,05	4,12	4,19	4,26	4,33	4,41	4,48	4,55	4,62	4,69
70	4,76	4,83	4,90	4,98	5,05	5,12	5,20	5,27	5,34	5,41
80	5,48	5,55	5,62	5,69	5,76	5,83	5,90	5,97	6,04	6,11
90	6,18	6,25	6,32	6,39	6,46	6,53	6,60	6,67	6,74	6,81

### Контрольные вопросы

1. Что называется теплопроводностью? Механизм передачи тепла в процессе теплопроводности.
2. Определения температурного поля. Какие температурные поля различают? Что такое стационарное и нестационарное температурное поле?
3. Что называется изотермической поверхностью? изотермой?
4. Дайте определение температурного градиента.
5. Основной закон теплопроводности.
6. Коэффициент теплопроводности, физический смысл, размерность.
7. Распределение температуры по толщине плоской и цилиндрической однослойных стенок.
8. Расчетные формулы теплового потока через однослойные и многослойные поверхности.
9. Схема экспериментальной установки и порядок проведения опыта.

### Лабораторная работа №3.

#### ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛООТДАЧИ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ТРУБЫ ПРИ СВОБОДНОЙ КОНВЕКЦИИ ВОЗДУХА

**Целью работы** является углубление знаний по теории конвективного теплообмена, ознакомление с методикой опытного исследования процесса теплообмена и получение навыков в проведении эксперимента.

#### Задание

1. Определить опытным путём коэффициент теплоотдачи конвекцией от горизонтальной трубы к воздуху.
2. Вычислить теоретическое значение коэффициента теплоотдачи от горизонтальной трубы к воздуху по критериальному уравнению и сравнить его с опытным значением.
3. Составить отчёт по работе.

### Теоретическая часть

В жидкостях и газах перенос тепла происходит при перемещении и перемешивании частиц с различной температурой. Обычно жидкости и газы нагреваются или охлаждаются при соприкосновении с поверхностями твердых тел.

Процесс теплообмена между поверхностью твердого тела и жидкостью или газом называется теплоотдачей или конвективным теплообменом. При этом перенос тепла осуществляется конвекцией и теплопроводностью.

В лабораторной работе рассматривается процесс теплоотдачи длинного цилиндра (трубы), расположенного в воздушной среде. Вдали от трубы воздух неподвижен и имеет постоянную температуру, равную  $t_f$ , а температура поверхности трубы не меняется во времени и равна  $t_w$ . Вблизи трубы температура воздуха изменяется от  $t_w$  до  $t_f$ , поэтому плотность воздуха у поверхности трубы будет меньше, чем вдали от неё. Вследствие разности плотностей воздуха возникает подъёмная сила, которая перемещает нагретые частицы воздуха вверх. На место переместившихся частиц воздуха поступают холодные частицы.

Движение воздуха, обусловленное разностью плотностей нагретых и холодных частиц, называют свободной или естественной конвекцией. Если движение газа или жидкости создаётся вентилятором или насосом, то конвекция называется вынужденной.

Тепловой поток, отдаваемый конвекцией от нагретой поверхности к жидкости или газу, определяется по формуле Ньютона-Рихмана:

$$Q_k = \alpha_k \cdot F \cdot (t_w - t_f), \quad (3.1)$$

где  $Q_k$  – тепловой поток, отдаваемый конвекцией, Вт;

$F$  – поверхность трубки,  $m^2$ ;

$t_w$  – температура поверхности трубки,  $^{\circ}C$ ;

$t_f$  – температура воздуха вдали от трубки,  $^{\circ}C$ ;

$\alpha_k$  – коэффициент теплоотдачи конвекцией,  $Вт/(m^2 \cdot K)$ .

Коэффициент теплоотдачи  $\alpha_k$  определяет интенсивность теплообмена и равен количеству тепла, отдаваемого в единицу



времени единицей поверхности при разности температур поверхности и воздуха 1 К.

Коэффициент теплоотдачи конвекцией  $\alpha_k$  зависит от скорости движения жидкости или газа, от температуры поверхности  $t_w$ , температуры газа (жидкости)  $t_f$ , физических свойств газа (жидкости), размеров и формы поверхности тела, его положения и многих других факторов, т.е.

$$\alpha_k = f(w, t_w, t_f, \rho, c, \lambda, \beta, \nu, d_1, d_2, \ell, \dots).$$

Поэтому в расчетах конвективного теплообмена определение коэффициента теплоотдачи  $\alpha_k$  вызывает большие затруднения.

Из опыта можно найти коэффициент теплоотдачи  $\alpha_k$  только для конкретной среды и для заданных условий эксперимента. Для переноса полученных результатов на другие рабочие среды и другие условия эксперимента прибегают к теории подобия.

Для установления подобия физических процессов отдельные физические размерные величины объединяют в безразмерные комплексы, которые называют критериями или числами подобия и которым присваивают имена выдающихся ученых.

Основные критерии теплового подобия: Nu – критерий Нуссельта; Pr – критерий Прандтля; Gr – критерий Грасгофа; Re – критерий Рейнольдса.

Критерий Нуссельта характеризует теплообмен на границе между стенкой и жидкостью (газом):

$$Nu = \alpha_k \cdot \ell / \lambda_f, \quad (3.2)$$

где  $\alpha_k$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$\ell$  – определяющий размер поверхности теплообмена, м;

$\lambda_f$  – коэффициент теплопроводности жидкости или газа при определяющей температуре, Вт/(м·К).

Критерий Прандтля характеризует влияние теплофизических свойств жидкости (газа) на теплообмен:

$$Pr = (\nu \cdot \rho \cdot c_p) / \lambda = \nu / a, \quad (3.3)$$

где  $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);

$a$  – коэффициент температуропроводности, м<sup>2</sup>/с;

$c_p$  – изобарная массовая теплоёмкость, Дж/(кг·К);

$\nu$  – коэффициент кинематической вязкости жидкости или газа, ( $\text{м}^2/\text{с}$ ). Значения всех величин принимаются при определяющей температуре.

Критерий Грасгофа характеризует подъёмную силу, возникающую в жидкости или газе вследствие разности плотностей:

$$\text{Gr} = (g \cdot \beta \cdot \ell^3 \cdot \Delta t) / \nu^2 \quad (3.4)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения,  $\text{м}/\text{с}^2$ ;

$\beta$  – температурный коэффициент объёмного расширения жидкости или газа,  $1/\text{К}$ ;

$\ell$  – определяющий размер поверхности теплообмена,  $\text{м}$ ;

$\Delta t$  – разность температур поверхности тела и жидкости,  $\text{К}$ .

Критерий Рейнольдса определяет гидромеханическое подобие течения жидкостей (газов) и характеризует режим движения жидкостей (газов):

$$\text{Re} = w \cdot \ell / \nu, \quad (3.5)$$

где  $w$  – определяющая скорость жидкости или газа,  $\text{м}/\text{с}$ ;

$\ell$  – определяющий размер,  $\text{м}$  (например, диаметр трубы, длина пластины и т.д.).

Если физические процессы подобны друг другу, то одноименные критерии подобия имеют одинаковую величину (1-я теорема подобия). Согласно второй теореме подобия связь между критериями подобия можно представить в виде зависимости:

$$\text{Nu} = f(\text{Re}, \text{Pr}, \text{Gr}, \dots).$$

При свободном движении воздуха в неограниченном пространстве критериальное уравнение имеет вид:

$$\text{Nu} = C \cdot (\text{Gr} \cdot \text{Pr})^n, \quad (3.6)$$

где  $C$  и  $n$  – постоянные опытные величины.

### Описание опытной установки

Опытная установка (рис. 3.1) представляет собой горизонтальную медную трубу диаметром  $d=0,025$  м и длиной  $\ell=0,935$  метра.

Внутри трубы находится электрический нагреватель 7. Мощность, потребляемая нагревателем, регулируется лабораторным автотрансформатором 8 и измеряется ваттметром 9.

Для измерения температуры поверхности трубы  $t_w$  в её стенке заложены хромель-копелевые термопары 1-5, а температура воздуха вдали от трубки  $t_f$  измеряется термопарой 6. Термопары 1–6 подключены к шеститочечному автоматическому потенциометру 10. По шкале потенциометра производится отсчет температур в  $^{\circ}\text{C}$ . Торцы трубки защищены тепловой изоляцией 11.

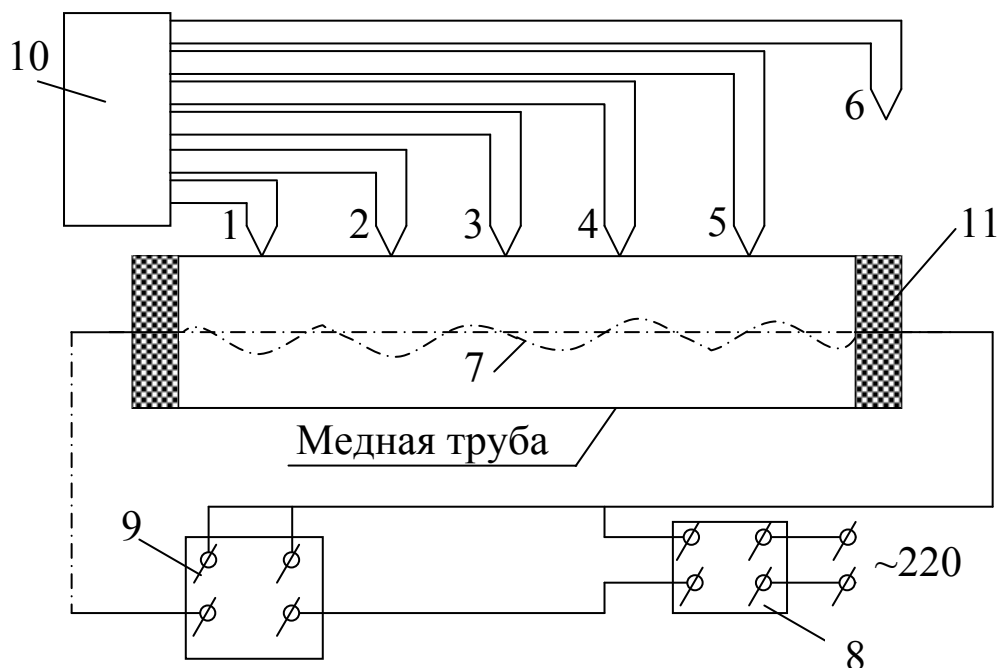


Рис. 3.1. Опытная установка

1-6-термопары; 7- электрический нагреватель; 8-ЛАТР;  
9- ваттметр; 10 - потенциометр; 11- тепловая изоляция.

### Проведение опыта

Установку включает и выключает преподаватель. Тепловой режим трубы регулируется при помощи автотрансформатора 8. Установив мощность нагревателя (40-60 Вт), необходимо следить за тем, чтобы она оставалась неизменной в течение всего опыта. Установка прогревается примерно 50-60 минут. После того как наступит стационарное состояние, записывают показания всех термопар 1-6 в таблицу 3.1. Производят три записи показаний термопар, делая интервал между записями 1-2 мин.

Таблица 3.1 – Протокол испытаний

Номера термодпар	1	2	3	4	5	6
Измеряемая температура	$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_4$	$t_5$	$t_6$
1 замер						
2 замер						
3 замер						
Среднее значение						
Мощность электрического нагревателя $Q=$ Вт.						

### Обработка результатов опыта

#### 1. Определение $\alpha_k$ опытным путем.

1.1. Определяется средняя температура поверхности трубки  $t_w, ^\circ\text{C}$ :

$$t_w = (t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5) / 5, \quad (3.7)$$

где  $t_1, t_2, \dots, t_5$  – средние значения температур поверхности трубки в точках 1-5.

1.2. Вычисляется поверхность трубки  $F, \text{м}^2$ :

$$F = \pi \cdot d \cdot \ell, \quad (3.8)$$

где  $d$  – диаметр трубки, м;  $\ell$  – длина трубки, м.

Измеренная в опыте мощность электрического нагревателя отдаётся поверхностью трубки в окружающую среду двумя путями: лучистым  $Q_{\text{л}}$  и конвективным  $Q_{\text{к}}$ , т.е. общий тепловой поток состоит из двух потоков

$$Q = Q_{\text{л}} + Q_{\text{к}}. \quad (3.9)$$

1.3. Определяется тепло  $Q_{\text{л}}, \text{Вт}$ , отдаваемое трубкой в окружающую среду путём теплового излучения.

$$Q_{\text{л}} = \varepsilon \cdot C_0 \cdot F \cdot \{[(273 + t_w) / 100]^4 - [(273 + t_f) / 100]^4\}, \quad (3.10)$$

где  $\varepsilon = 0,38$  – степень черноты поверхности трубки;  
 $C_0 = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$  – коэффициент лучеиспускания абсолютно чёрного тела.

1.4. Находится тепло  $Q_{\text{к}}, \text{Вт}$ , отдаваемое трубкой в окружающую среду путем конвекции.

$$Q_k = Q - Q_{\text{л}}. \quad (3.11)$$

1.5. Вычисляется коэффициент теплоотдачи  $\alpha_k$ , Вт/(м<sup>2</sup>·К) из уравнения Ньютона-Рихмана (3.1):

$$\alpha_k = Q_k / [F(t_w - t_f)]. \quad (3.12)$$

## 2. Определение теоретического значения $\alpha_k$

2.1. Критерий  $Gr_f$  определяется по уравнению (3.4):

$$Gr_f = \frac{g \cdot d^3}{\nu_f^2} \cdot \beta_f (t_w - t_f),$$

где  $g = 9,81$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$d$  – внешний диаметр трубы, м;

$t_w$  – температура поверхности трубы, °С;

$t_f$  – температура воздуха вдали от трубки, °С;

$\nu_f$  – коэффициент кинематической вязкости воздуха при температуре  $t_f$ , м<sup>2</sup>/с;

$\beta_f = 1/(273 + t_f)$  – коэффициент термического расширения, 1/К.

2.2. Вычисляется значение критерия  $Nu_f$  по формуле (3.6):

$$Nu_f = 0,5 (Gr_f \cdot Pr_f)^{0,25},$$

где  $C=0,5$ ;  $n=0,25$  – постоянные опытные величины для горизонтальной трубы.

Значения коэффициента теплопроводности  $\lambda_f$ , коэффициента кинематической вязкости  $\nu_f$ , и критерия Прандтля  $Pr_f$  находим из таблицы 3.2 по температуре  $t_f$ .

2.3. Из формулы (3.2) для критерия Нуссельта  $Nu_f$  находится коэффициент теплоотдачи конвекцией:

$$\alpha_k = Nu_f \cdot \lambda_f / d.$$

После этого сравниваются значения  $\alpha_k$ , полученные опытным и теоретическим путем.

Таблица 3.2 – Физические параметры сухого воздуха при давлении 101325 Па

$t, ^\circ\text{C}$	10	20	30
$\lambda_f, \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$	0,02551	0,0259	0,0267
$\nu_f, \text{м}^2/\text{с}$	$14,16 \cdot 10^{-6}$	$15,06 \cdot 10^{-6}$	$16,01 \cdot 10^{-6}$
$Pr_f$	0,705	0,703	0,701

### **Контрольные вопросы**

1. Что называется конвекцией? Какие виды конвекции существуют?
2. Что называется свободной конвекцией? Каков механизм теплоотдачи при свободной конвекции?
3. Что называется вынужденной конвекцией? Каков механизм теплоотдачи при вынужденной конвекции?
4. Что такое конвективная теплоотдача?
5. Основное уравнение теплоотдачи.
6. Коэффициент теплоотдачи, физический смысл, размерность. От каких факторов зависит коэффициент теплоотдачи?
7. Критерии теплового подобия, формулы, их физический смысл.
8. Критериальное уравнение теплоотдачи при свободной конвекции.
9. Описание лабораторной установки и ход проведения опыта.
10. В чем суть расчета коэффициента теплоотдачи первым и вторым способом?

### **Лабораторная работа № 4.**

#### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ИЗЛУЧЕНИЯ И СТЕПЕНИ ЧЕРНОТЫ ТВЕРДОГО ТЕЛА**

**Целью работы** является углубление знаний по теории лучистого теплообмена, изучение методики проведения работы и развитие навыков в проведении эксперимента.

#### **Задание**

1. Определить опытным путем коэффициент излучения и степень черноты окисленной поверхности медной трубы.
2. Сравнить полученные результаты с табличными данными степени черноты для аналогичной поверхности.
3. Составить отчет по выполненной работе.

#### **Теоретическая часть**

Теплообмен излучением - это процесс передачи теплоты от одного тела к другому в виде электромагнитных волн. Он представляет собой превращение внутренней энергии тела в

энергию электромагнитных волн (или фотонов) с последующим превращением последней во внутреннюю энергию других тел.

В инженерных расчетах теплообмен излучением между телами, разделенными прозрачной (диатермичной) средой, проводится в предположении о том, что излучающие поверхности серые. Серым телом называется тело, поглощательная способность которого не зависит от длины волны.

Поверхностная плотность потока собственного излучения тела, Вт/м<sup>2</sup>, имеющего абсолютную температуру  $T$ , К определяется по закону Стефана Больцмана:

$$E = \varepsilon \cdot C_0 (T/100)^4 = C (T/100)^4, \quad (4.1)$$

где  $\varepsilon$  - степень черноты или интегральный коэффициент теплового излучения – отношение плотностей потока излучения  $E$  реального тела и абсолютно черного тела  $E_0$  или отношение коэффициентов лучеиспускания реального тела  $C$  и абсолютно черного тела  $C_0 = 5,67$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>). Тогда для реального тела

$$C = \varepsilon \cdot C_0. \quad (4.2)$$

Значение  $C$  изменяется от 0 до 5,67, а  $\varepsilon$  - от 0 до 1.

Тепловой поток излучения  $Q_{1-2}$ , Вт, между двумя телами, имеющими температуры  $T_1$  и  $T_2$  ( $T_1 > T_2$ ), определяется в общем виде по формуле:

$$Q_{1-2} = \varepsilon_{i\delta} \cdot \tilde{n}_i \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] F, \text{ Вт}, \quad (4.3)$$

где  $\varepsilon_{пр}$  - приведенный коэффициент степени черноты системы двух тел;  $F$  - площадь поверхности тела с температурой  $T_1$ , м<sup>2</sup>.

Приведенный коэффициент степени черноты  $\varepsilon_{пр}$  системы двух тел определяется по формулам:

1) два тела с параллельными поверхностями больших размеров

$$\varepsilon_{i\delta} = \left[ \frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right]^{-1}; \quad (4.4)$$

2) тело с площадью поверхности  $F_1$  находится внутри другого тела с площадью поверхности  $F_2$

$$\varepsilon_{i\delta} = \left[ \frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{F_1}{F_2} \left( \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right) \right]^{-1}. \quad (4.5)$$

При  $F_2 \gg F_1$  имеем  $F_1/F_2 \rightarrow 0$ , тогда  $\varepsilon_{пр} = \varepsilon_1$ ;

3) при наличии  $n$  плоских экранов, расположенных между двумя телами с параллельными поверхностями больших размеров:

$$\varepsilon_{i\delta} = \left[ \frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} + 2 \sum_{i=1}^n \frac{1}{\varepsilon_{yi}} - 1 \right]^{-1} \quad (4.6)$$

где  $\varepsilon_{yi}$  – степень черноты  $i$ -го экрана.

Лучисто-конвективный теплообмен между телами с температурами  $T_1$  и  $T_2$  ( $T_1 > T_2$ ) рассчитывается по формуле:

$$\begin{aligned} Q_{\delta, \hat{e}} &= Q_{\delta} + Q_{\hat{e}} = \\ &= \varepsilon_{i\delta} \cdot \tilde{n}_i \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] F_1 + \alpha_{\hat{e}} \cdot (\dot{O}_1 - \dot{O}_2) F_1 \end{aligned} \quad (4.7)$$

### Описание опытной установки

Опытная установка (рис. 4.1) представляет собой горизонтальную медную трубу диаметром  $d=0,025$  м и длиной  $l=0,935$  м. Для измерения температуры поверхности трубы в её стенке по длине заложены пять хромель-копелевых термопар 1-5. Температура воздуха вдали от трубки измеряется термопарой 6. Внутри медной трубы имеется электрический нагреватель 7. Мощность, потребляемая нагревателем, регулируется лабораторным автотрансформатором (ЛАТРОм) 8 и измеряется ваттметром 9. Термопары 1-6 подключены к потенциометру 10. По шкале потенциометра производится отсчет температур в °С. Торцы медной трубы защищены тепловой изоляцией 11.

### Проведение опыта

При помощи ЛАТРа устанавливается режим нагрева трубки (40-60 Вт). Установив мощность нагревателя, необходимо следить за тем, чтобы она оставалась неизменной в течение всего опыта. Установка разогревается 50-60 минут. После того как наступило стационарное состояние, записывают показания термопар 1-6 и ваттметра.



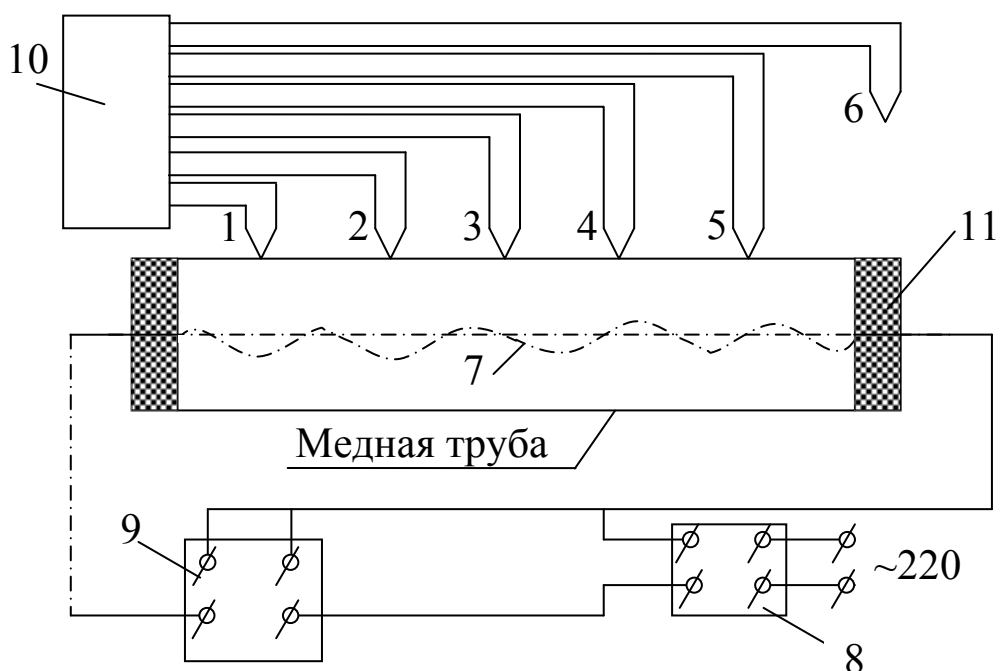


Рис.4.1. Принципиальная схема лабораторной установки:  
1-6-термопары; 7- электрический нагреватель; 8-ЛАТР; 9-  
ваттметр; 10 - потенциометр; 11- тепловая изоляция.

Производят три записи показаний термопар. Интервал между записями 1-2 минуты. После замеров установка выключается либо преподавателем, либо лаборантом. Результаты замеров заносят в протокол испытаний.

Таблица 4.1 – Протокол испытаний

Номера термопар	1	2	3	4	5	6
Измеряемая температура	$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_4$	$t_5$	$t_6$
1 замер						
2 замер						
3 замер						
Среднее значение $t_{cp i}$						
Мощность электрического нагревателя $Q=.....$ Вт.						

### Основные расчетные формулы опыта

Тепло, выделяемое электрическим нагревателем, отдается горячей поверхностью трубы окружающей среде лучистым  $Q_{\text{л}}$  и конвективным  $Q_{\text{к}}$  теплообменом, то есть общий тепловой поток от трубки к воздуху

$$Q = Q_{\text{л}} + Q_{\text{к}}. \quad (4.8)$$

Искомые в данной работе величины коэффициента излучения  $C$  и степени черноты  $\varepsilon$  следует определять из формулы лучистого теплового потока

$$Q_{\varepsilon} = \varepsilon \cdot \tilde{n}_i \left[ \left( \frac{T_w}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_f}{100} \right)^4 \right] \cdot F \quad (4.9)$$

где  $C = \varepsilon \cdot C_0$  - коэффициент излучения, Вт/(м<sup>2</sup> К<sup>4</sup>);  $\varepsilon$  - степень черноты поверхности трубы;  $C_0 = 5,67$  Вт/(м<sup>2</sup> К<sup>4</sup>) - коэффициент лучеиспускания абсолютно черного тела;  $F$  - поверхность теплообмена, м;  $T_w$  - температура поверхности трубки, К,  $T_w = 273 + t_w$ ;  $T_f$  - температура воздуха, К,  $T_f = 273 + t_f$ .

Если определить конвективную составляющую  $Q_{\text{к}}$  по уравнению Ньютона-Рихмана

$$Q_{\varepsilon} = \alpha \cdot (t_w - t_f) \cdot F, \quad (4.10)$$

где  $\alpha$  - коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup> К), определяемый из критериального уравнения для условий свободной конвекции горизонтальной трубы:

$$Nu_f = 0,5 (Gr_f \cdot Pr_f)^{0,25}, \quad (4.11)$$

где  $Nu_f$  - критерий Нуссельта при температуре теплоносителя (воздуха)  $t_f$ ;  $Gr_f$  - критерий Грасгофа;  $Pr_f$  - критерий Прандтля.

То лучистая составляющая определяется из уравнения (1)

$$Q_{\text{л}} = Q - Q_{\text{к}}, \quad (4.12)$$

и тогда из уравнения (4.9) можно будет определить искомые  $C$  и  $\varepsilon$ .

### Расчет вести в следующей последовательности:

1. Находится средняя температура поверхности трубки как среднее арифметическое:

$$t_w = (t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5) / 5, \quad ^\circ\text{C} \quad (4.13)$$

2. Определяется площадь поверхности трубки:

$$F = \pi \cdot d \cdot l, \quad \text{м}^2, \quad (4.14)$$

где  $d$  – внешний диаметр трубы, м;  $l$  - длина трубы, м.

3. Выбираются теплофизические свойства воздуха по температуре воздуха  $t_f$  из соответствующей таблицы 4.2:

$\lambda_f$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);

$\nu_f$  – коэффициент кинематической вязкости, м<sup>2</sup>/с;

$Pr_f$  – критерий Прандтля.

Таблица 4.2 – Теплофизические свойства воздуха

$t, ^\circ\text{C}$	$\lambda_f$ Вт/(м·К)	$\nu_f$ м <sup>2</sup> /с	$Pr_f$
10	0,02551	$14,16 \cdot 10^{-6}$	0,705
20	0,0259	$15,06 \cdot 10^{-6}$	0,703
30	0,0267	$16,01 \cdot 10^{-6}$	0,701

4. Определяется критерий Грасгофа:

$$Gr_f = \frac{g \cdot d^3}{\nu_f^2} \cdot \beta_f \cdot \Delta t \quad (4.15)$$

где  $g$  – ускорение силы тяжести  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup>;  $\Delta t$  – разность температур,  $\Delta t = t_w - t_f$ ;  $\beta_f$  - коэффициент термического расширения воздуха, 1/К, определяемый по формуле

$$\beta_f = 1/(273 + t_f). \quad (4.16)$$

5. Находится критерий Нуссельта из уравнения (4.11):

$$Nu_f = 0,5(Gr_f Pr_f)^{0,25}$$

6. Рассчитывается коэффициент теплоотдачи по формуле:

$$\alpha = \frac{Nu_f \cdot \lambda_f}{d}, \text{ Вт/(м}^2 \cdot ^\circ\text{C)} \quad (4.17)$$

7. Определяется конвективный тепловой поток из уравнения Ньютона-Рихмана (4.10):

$$Q_{\dot{e}} = \alpha \cdot (t_w - t_f) \cdot F, \text{ Вт.}$$

8. Определяется тепловой поток лучеиспусканием из (4.8):

$$Q_{\text{л}} = Q - Q_{\text{к}}, \text{ Вт} \quad (4.18)$$

9. Из уравнения (2) находится степень черноты поверхности трубки

$$\varepsilon = \frac{Q_{\ddot{e}}}{\tilde{n}_i \left[ \left( \frac{T_w}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_f}{100} \right)^4 \right] \cdot F} \quad (4.19)$$

10. Рассчитывается коэффициент лучеиспускания окисленной поверхности медной трубки

$$C = \varepsilon \cdot C_0, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К}^4). \quad (4.20)$$

11. Необходимо сравнить опытные значения степени черноты  $\varepsilon$  с табличными данными для медной окисленной поверхности ( $\varepsilon=0,62$ ).

### Контрольные вопросы

1. Что называется тепловым излучением?
2. Назовите примеры теплообмена излучением в природе и технике.
3. Опишите основные законы теплового излучения (закон Стефана-Больцмана, Кирхгофа). В чем их суть.
4. Основные понятия лучистого теплообмена, плотность теплового потока излучения, излучательная способность  $E$ , абсолютно черное, абсолютно белое, абсолютно прозрачное тела. Серое тело.
5. Опишите основные случаи теплового излучения и формулы для их расчета (приведенной степени черноты).
6. Для чего применяется экранирование? Основные расчетные формулы.
7. Описание лабораторной установки и ход проведения опыта.
8. Основы расчета сложного лучисто-конвективного теплообмена.

## Лабораторная работа №5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ В ТЕПЛООБМЕННИКЕ ТИПА "ТРУБА В ТРУБЕ"

**Целью работы** является углубление знаний по теории теплопередачи в теплообменной аппаратуре, изучение методики экспериментального определения коэффициента теплопередачи и получение навыков в проведении экспериментальных работ.

### Задание

1. Определить экспериментальным путем коэффициент теплопередачи в теплообменнике типа "труба в трубе".
2. Вычислить значение коэффициента теплопередачи по критериальным уравнениям и сравнить его с опытным значением.
3. Составить отчет по выполненной работе.

### Теоретическая часть

Теплопередача - процесс переноса тепла от одного теплоносителя к другому через разделяющую их стенку.

Процесс теплопередачи представляет собой процесс сложного теплообмена из следующих этапов, (рис. 5.1):

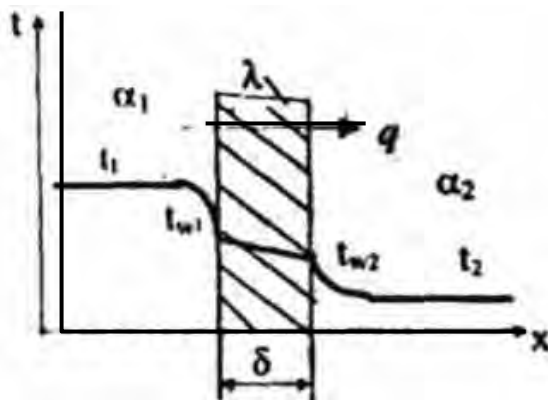


Рис.5.1. Распределение температур по нормали к поверхности теплопередачи

- 1) теплоотдача между горячим теплоносителем и поверхностью стенки:

$$q = \alpha_1 \cdot (t_1 - t_{w1}) \quad (5.1)$$

- 2) теплопроводность через стенку:

$$q = \frac{\lambda}{\delta} \cdot (t_{w1} - t_{w2}) \quad (5.2)$$

3) теплоотдача от поверхности стенки к холодному теплоносителю:

$$q = \alpha_2 \cdot (t_{w2} - t_2) \quad (5.3)$$

где  $t_{w1}$ ,  $t_{w2}$  - температуры поверхностей стенки, °С;

$\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  - коэффициенты теплоотдачи от горячего теплоносителя к стенке и от стенки к холодному теплоносителю соответственно, Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Если режим передачи тепла стационарный, то тепловой поток, передаваемый от горячего теплоносителя к холодному через разделяющую их стенку будет оставаться неизменным.

Совместное решение уравнений (5.1), (5.2) и (5.3) приводит к получению *уравнения теплопередачи*:

$$Q = k \cdot \Delta t_{cp} \cdot F, \quad (5.4)$$

$$q = k \cdot \Delta t_{cp}, \quad (5.5)$$

где  $Q$  - тепловой поток, передаваемый от горячего теплоносителя к холодному, Вт;

$q$  - удельный тепловой поток (плотность теплового потока), Вт/м<sup>2</sup>;

$\Delta t_{cp}$  - средний температурный напор, °С; является движущей силой процесса теплопередачи. В простейшем случае он равен разности средних температур теплоносителей, т.е.

$$\Delta t_{cp} = t_1 - t_2, \quad (5.6)$$

где  $t_1$ ,  $t_2$  - средние температуры горячего и холодного теплоносителей соответственно, °С;

$k$  - коэффициент теплопередачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К).

*Коэффициент теплопередачи* определяет интенсивность теплопередачи. Он равен количеству тепла, передаваемого в единицу времени (с) через 1 м<sup>2</sup> поверхности стенки при разности температур между горячим и холодным теплоносителями 1°С или 1 К. Определяется по формуле

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (5.7)$$

где  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  - коэффициенты теплоотдачи со стороны горячего и холодного теплоносителей, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $\delta$  - толщина стенки, м;  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К).

Величина, обратная коэффициенту теплопередачи, называется *термическим сопротивлением теплопередаче* и обозначается  $R$ ,  $(\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}$ :

$$R = \frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}. \quad (5.8)$$

Формула (5.8) показывает, что общее термическое сопротивление равно сумме частных сопротивлений:  $1/\alpha_1$ ,  $\delta/\lambda$ ,  $1/\alpha_2$ .

Если стенка не однослойная, а состоит из нескольких слоев с различной толщиной  $\delta_1, \delta_2, \delta_3, \dots, \delta_n$  и коэффициенты теплопроводности этих слоев  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_n$ , то коэффициент теплопередачи определяют по формуле:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (5.9)$$

где  $\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}$  - сумма термических сопротивлений слоев плоской стенки.

Для цилиндрической стенки уравнение теплопередачи будет иметь вид

$$Q = \pi \cdot k_l \cdot \Delta t_{\text{ср}} \cdot l. \quad (5.10)$$

где  $l$  - длина цилиндрической стенки, м;

$d_2, d_1$  - наружный и внутренний диаметры стенки, м;

$k_l$  - линейный коэффициент теплопередачи,  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ , определяемый по формуле:

$$k_l = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 \cdot d_1} + \frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2 \cdot d_2}} \quad (5.11)$$

На практике уравнение (10) применяют для толстостенных цилиндрических стенок, когда отношение  $d_2/d_1 > 1,4$ . Для труб с тонкими стенками  $d_2/d_1 < 1,4$  расчет можно вести по формулам для плоской стенки (5.4), (5.8), (5.9).

Коэффициент теплопередачи всегда меньше меньшего коэффициента теплоотдачи, поэтому для увеличения  $k$  необходимо в первую очередь увеличить меньший коэффициент теплоотдачи (или уменьшить большее термическое сопротивление).

Процесс передачи тепла от одного теплоносителя к другому осуществляется в устройствах, которые называются *теплообменными аппаратами*.

По принципу действия аппараты разделяются на рекуперативные, регенеративные и смешительные.

*Рекуперативными* называются аппараты, в которых тепло от горячего теплоносителя к холодному передается через разделяющую их стенку. Аппараты этого типа получили широкое применение в промышленности.

*Регенеративные теплообменники* - аппараты, в которых одна и та же поверхность нагрева омывается поочередно горячим и холодным теплоносителями

*Смесительные теплообменники* - аппараты, в которых теплопередача осуществляется при непосредственном соприкосновении и смешении горячего и холодного теплоносителей.

В теплообменных аппаратах движение жидкости осуществляется по трем основным схемам прямоточной, противоточной и перекрестной (рис.5.2).

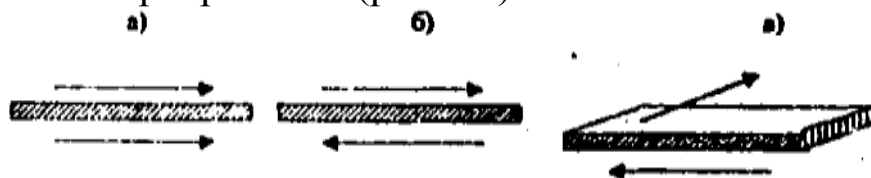


Рис.5.2. Схемы движения жидкостей в теплообменниках:  
а - прямоточная, б - противоточная, в - перекрестный ток.

В схеме прямотока горячий и холодный теплоносители движутся параллельно в одном направлении, а в схеме противотока - в противоположных направлениях. В схеме перекрестного тока движение одного теплоносителя перпендикулярно движению другого. На практике встречаются и более сложные схемы, включающие различные комбинации основных.

Основными расчетными уравнениями для теплообменных аппаратов являются уравнение теплового баланса и уравнение теплопередачи.

*Уравнение теплового баланса.*

Если теплоноситель не изменяет агрегатного состояния, то уравнение теплового баланса имеет вид:



$$Q = G_1 \cdot c_{p1} \cdot (t_1' - t_1'') = G_2 \cdot c_{p2} \cdot (t_2'' - t_2') \quad (5.12)$$

или

$$Q = V_1 \cdot \rho_1 \cdot c_{p1} \cdot (t_1' - t_1'') = V_2 \cdot \rho_2 \cdot c_{p2} \cdot (t_2'' - t_2') \quad (5.13)$$

где  $G_1, G_2$  - массовые расходы теплоносителей, кг/с;

$V_1, V_2$  - объемные расходы теплоносителей, м<sup>3</sup>/с;

$c_{p1}, c_{p2}$  - средние изобарные теплоемкости теплоносителей в диапазоне температур от  $t'$  до  $t''$ , Дж/(кг·К);

$\rho_1, \rho_2$  - плотности теплоносителей, кг/м<sup>3</sup>.

При изменении агрегатного состояния одного из теплоносителей (при кипении или конденсации) уравнение теплового баланса будет иметь вид:

$$Q = G_1 \cdot r_1 = G_2 \cdot c_{p2} \cdot (t_2'' - t_2') \quad (5.14)$$

где  $r$  - скрытая теплота парообразования (конденсации) при температуре насыщения, Дж/кг.

Уравнение теплового баланса позволяет в первую очередь определить тепловой поток  $Q$ , а затем (если есть необходимость) найти один неизвестный параметр: либо расход одного из теплоносителей, либо одну из температур. Все остальные параметры должны быть известными.

*Уравнение теплопередачи.*

$$Q = k \cdot \Delta t_{cp} \cdot F \quad (5.15)$$

где  $K$  - коэффициент теплопередачи, Вт/(м<sup>2</sup>·°C), определяется по формуле (5.7).

$\Delta t_{cp}$  - средний температурный напор, °C;

$F$  - поверхность теплопередачи, м<sup>2</sup>.

Средний температурный напор  $\Delta t_{cp}$  зависит от схемы движения теплоносителей (рис.5.3):

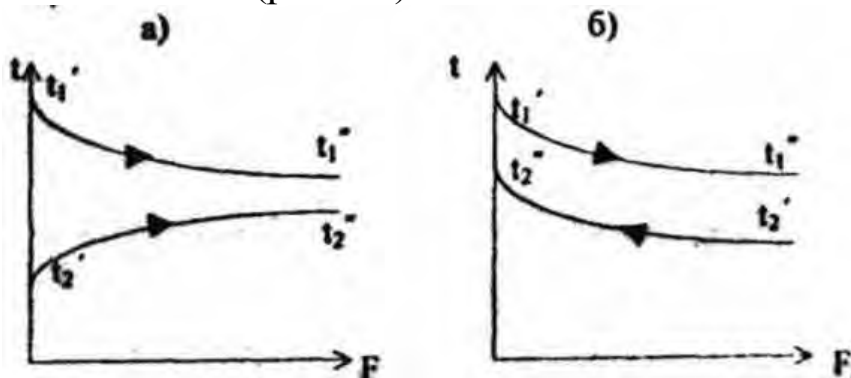


Рис.5.3. Изменение температур теплоносителей вдоль поверхности теплообмена при а) прямотоке и б) противотоке

Величина  $\Delta t_{cp}$  определяется через  $\Delta t_{\delta}$  - разность температур между теплоносителями на том конце аппарата, где она больше, и  $\Delta t_{m}$  - меньшая разность температур между теплоносителями на противоположном конце аппарата.

$$\text{Если } \Delta t_{\delta} / \Delta t_{m} < 2, \text{ то } \Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_{\delta} + \Delta t_{m}}{2} \quad (5.16)$$

$$\text{Если } \Delta t_{\delta} / \Delta t_{m} > 2, \text{ то } \Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_{\delta} - \Delta t_{m}}{\ln \frac{\Delta t_{\delta}}{\Delta t_{m}}} \quad (5.17)$$

Средний температурный напор по противотоку при прочих равных условиях больше, чем при прямотоке.

### Описание опытной установки

Схема опытной установки представлена на рис. 5.4.

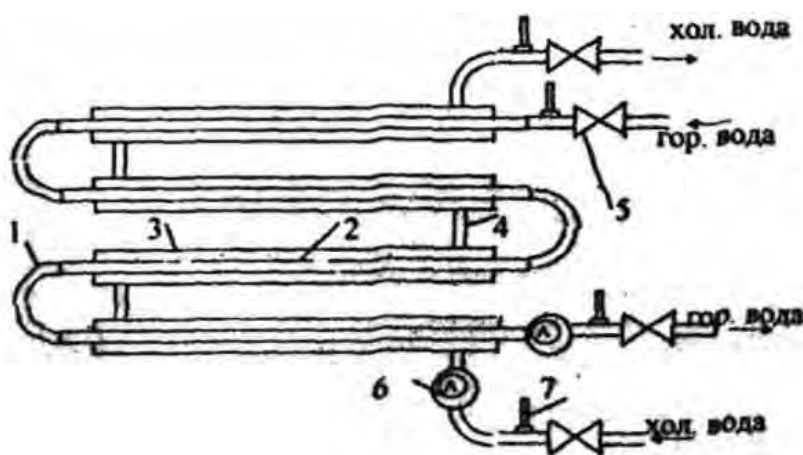


Рис. 5.4. Схема опытной установки

Теплообменник типа "труба в трубе" собран из четырех теплообменных элементов, состоящих из внутренней 2 и наружной 3 труб. Элементы соединяются друг с другом коленом 1 и патрубками 4. Горячая вода поступает во внутреннюю трубу верхнего теплообменного элемента и по коленам 1 последовательно проходит все теплообменные элементы. Холодная вода поступает в кольцевой зазор между внутренней 2 и наружной 3

3 трубами нижнего теплообменного элемента и по патрубкам 4 проходит по всем теплообменным элементам. Расходы теплоносителей регулируются вентилями 5 и определяются объемным способом водяными счетчиками 6 и секундомером. Для измерения температур используются термометры 7.

### Порядок выполнения работы

- 1) Открыть вентили подачи холодной и горячей воды.
- 2) Следить за показаниями термометров. После стабилизации температур записать показания термометров.
- 3) Измерить расходы, для чего надо засечь время прохождения заданных объемов холодной и горячей воды.
- 4) Закрыть вентили подачи холодной и горячей воды.
- 5) Результаты измерения занести в табл. 5.1.

### Обработка опытных данных

Таблица 5.1 – Протокол испытаний

Параметр	Горячий т/н	Холодный т/н	Теплообменник
<b>Опытные данные</b>			
Начальная температура, °С	$t_1' =$	$t_2' =$	
Конечная температура, °С	$t_1'' =$	$t_2'' =$	
Объем, м <sup>3</sup>	$W_1 =$	$W_2 =$	
Время, с	$\tau_1 =$	$\tau_2 =$	
<b>Расчетные параметры</b>			
Средняя температура, °С	$t_1 =$	$t_2 =$	$t_w =$
Скорость, м/с	$v_1 =$	$v_2 =$	
Критерий Рейнольдса	$Re_1 =$	$Re_2 =$	
Критерий Нуссельта	$Nu_1 =$	$Nu_2 =$	
Коэффициент теплоотдачи, Вт/(м <sup>2</sup> ·°С)	$\alpha_1 =$	$\alpha_2 =$	
Тепловой поток, Вт			$Q =$
Опытный коэффициент теплопередачи, Вт/(м <sup>2</sup> ·°С)			$k_o =$
Теоретический			$k_T =$

коэффициент теплопередачи, Вт/(м <sup>2</sup> ·°С)			
--	--	--	--

### Опытное определение коэффициента теплопередачи

1) Средние температуры горячего и холодного теплоносителей определяем по формулам:

$$t_1 = 0,5(t_1' + t_1'') \quad \text{и} \quad t_2 = 0,5(t_2' + t_2'') \quad (5.18)$$

2) Среднюю температуру поверхностей теплопередачи внутренней трубы определяем по формуле:

$$t_w = 0,5(t_1 + t_2) \quad (5.19)$$

3) Теплофизические свойства теплоносителей выбираются по средним температурам  $t_1$  и  $t_2$ , и помещаются в табл.5.2; критерий  $Pr_w$  выбирается по средней температуре стенки внутренней трубы  $t_w$ .

Таблица 5.2 – Теплофизические свойства воды

Теплоноситель	$t$ , °С	$c_p$ , Дж/(кг·°С)	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\nu$ , м <sup>2</sup> /с	$\lambda$ , Вт/(м·°С)	$\beta$ , 1/К	Pr
Горячая вода	$t_1 =$						
Холодная вода	$t_2 =$						
	$t_w =$	-	-	-	-	-	$Pr_w =$

4). Поверхность теплопередачи  $F$ , м<sup>2</sup>, определяем по формуле:

$$F = 4\pi \cdot d_{cp} \cdot L, \quad (5.20)$$

где  $L=0,935$  м - длина одного элемента;

$d_{cp}=0,5(d_B+d_H)$  - средний диаметр внутренней трубы, м;  
 $d_B=0,028$  м,  $d_H=0,032$  м - внутренний и наружный диаметры внутренней трубы.

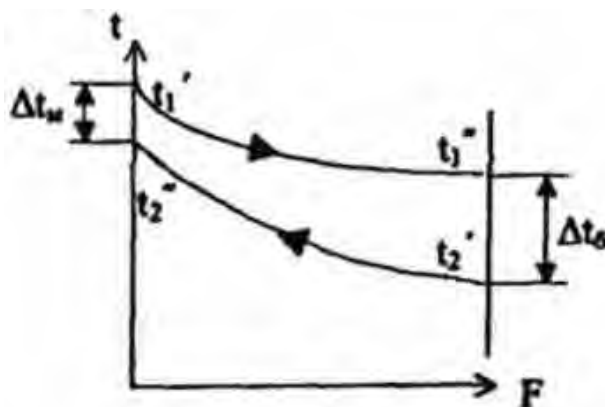


Рис.5.5. Схема распределения температур вдоль поверхности

теплообмена при противотоке

5) Среднюю разность температур  $\Delta t_{cp}$  определяем по схеме (рис.5.5) и по формулам (5.16) или (5.17) теплообмена при противотоке:

$$\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_{\delta} + \Delta t_{\mu}}{2}, \text{ если } \Delta t_{\delta} / \Delta t_{\mu} < 2,$$

$$\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_{\delta} - \Delta t_{\mu}}{\ln \frac{\Delta t_{\delta}}{\Delta t_{\mu}}}, \text{ если } \Delta t_{\delta} / \Delta t_{\mu} > 2,$$

где  $\Delta t_{\delta}$  - большая разность температур между теплоносителями на одном конце теплообменника, °С;

$\Delta t_{\mu}$  - меньшая разность температур между теплоносителями на другом конце теплообменника, °С.

6) Тепловая нагрузка аппарата Q, Вт.

Так как при работе аппарата он не успевает выйти на стационарный режим, то теплота горячей и холодной воды не одинакова (тепловой баланс не сходится), поэтому тепловой поток определяем по формуле:

$$Q = [V_1 \cdot \rho_1 \cdot c_{p1} \cdot (t_1' - t_1'') + V_2 \cdot \rho_2 \cdot c_{p2} \cdot (t_2'' - t_2')] / 2 \quad (5.21)$$

где  $V_1, V_2$  - объемные расходы, м<sup>3</sup>/с, вычисляем  $V_1 = W_1 / \tau_1$ ,  $V_2 = W_2 / \tau_2$ ;

$\rho_1, \rho_2$  - плотности теплоносителей, кг/м<sup>3</sup> (см табл. 5.2);

$c_{p1}, c_{p2}$  - теплоемкости теплоносителей, Дж/(кг·°С), (см табл. 5.2);

7) Опытный коэффициент теплопередачи вычисляем, Вт/(м<sup>2</sup>·°С):

$$k_o = Q / (F \cdot \Delta t_{cp}) \quad (5.22)$$

### ***Теоретическое определение коэффициента теплопередачи***

1) Скорости движения горячей и холодной воды вычисляем по формулам, м/с:

$$v_1 = \frac{4V_1}{\pi \cdot d_g^2}, \quad (5.23)$$

$$v_2 = \frac{4V_2}{\pi \cdot (D^2 - d_n^2)} \quad (5.24)$$

где  $v_1, v_2$  - скорости горячей и холодной воды, м/с;  $D$  - внутренний диаметр наружной трубы, м,  $D=0,068$  м.

2) Критерии Рейнольдса для теплоносителей определяем по формулам:

$$Re_1 = v_1 \cdot d_B / \nu_1 \quad (5.25)$$

$$Re_2 = v_2 \cdot d_{\text{экв}} / \nu_2 \quad (5.26)$$

где  $d_{\text{экв}}$  - эквивалентный диаметр потока для холодной воды, м, определяем по формуле:  $d_{\text{экв}} = D - d_H$ ;

$\nu_1, \nu_2$  - кинематическая вязкость горячей и холодной воды,  $\text{м}^2/\text{с}$ , (см табл. 5.2).

3) Критерий Нуссельта находится для каждого теплоносителя по одному из критериальных уравнений:

$$Nu = 0,021 Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43} \cdot (Pr/Pr_w)^{0,25} \quad \text{при } Re > 10000 \quad (5.27)$$

$$Nu = Ko \cdot Pr^{0,43} \quad \text{при } 2300 < Re < 10000 \quad (5.28)$$

$$Nu = 0,15 Re^{0,33} \cdot Pr^{0,43} \cdot Gr^{0,1} \cdot (Pr/Pr_w)^{0,25} \quad \text{при } Re < 2300 \quad (5.29)$$

где  $Ko$  - коэффициент, зависит от величины критерия Рейнольдса и находится по табл.5.3.

Таблица 5.3 – Значение множителя  $Ko$

Re	2100	2200	2300	2400	2500	3000	4000	5000	6000	8000	10000
Ko	1,90	2,20	3,3	3,90	4,40	6,00	10,3	15,5	19,5	27,0	33,3

4) Коэффициенты теплоотдачи определяем по формулам,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ :

$$\alpha_1 = Nu_1 \cdot \lambda_1 / d_B, \quad (5.30)$$

$$\alpha_2 = Nu_2 \cdot \lambda_2 / d_{\text{экв}} \quad (5.31)$$

5) Теоретический коэффициент теплопередачи рассчитаем по формуле,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ :

$$k_T = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} + R_3} \quad (5.32)$$

где  $\lambda = 46 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$  - коэффициент теплопроводности стали;

$\delta = 0,002$  м - толщина стенки внутренней трубы;

$R_3 = 0,0015 \text{ (м}^2 \cdot ^\circ\text{C)/Вт}$  – суммарное термическое сопротивление загрязнений на поверхностях трубы (накипи и ржавчины).

6) Полученное значение коэффициента теплопередачи  $k_T$  сравнить с опытным значением  $k_0$ .

### Контрольные вопросы

1. Что называется теплообменным аппаратом?
2. Классификация теплообменных аппаратов.
3. Уравнение теплового баланса для теплообменного аппарата.
3. Уравнение теплопередачи.
- 4 Коэффициент теплопередачи. Физический смысл, формулы.
5. Схемы движения теплоносителей в теплообменных аппаратах.
6. Схемы распределения температур теплоносителей вдоль поверхности теплообмена.
7. Средний температурный напор  $\Delta t_{cp}$ , формулы для расчета: среднеарифметический и среднелогарифмический температурный напоры.
8. Режим течения теплоносителей и критериальные уравнения конвективного теплообмена, их выбор.
9. Описание лабораторной установки и ход проведения опыта.
10. Методики расчета коэффициента теплопередачи. В чем их суть и отличия?

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Теплотехника: [Текст]: учебник / под ред. А. П. Баскакова. - 3-е изд., перераб. и доп. - М.: БАСТЕТ, 2010. - 328 с.
2. Техническая термодинамика и теплотехника: [Текст]: учебное пособие / под ред. А. А. Захаровой. - 2-е изд., испр. - М.: Академия, 2008. - 272 с.
3. Ерофеев В.А., Семёнов П.Д., Пряхин А.С. Теплотехника/Под ред. В.П.Ерофеева.-М.:Академкнига, 2006. 456 с.
4. Примеры и задачи по тепломассообмену [Текст] : [учебное пособие] / В. С. Логинов [и др.]. - Изд. 2-е, испр. и доп. - Санкт-Петербург : Лань , 2011. - 256 с.
5. Брюханов О. Н. Основы гидравлики и теплотехники: [Текст]: учебник / О. Н. Брюханов, А. Т. Мелик-Аракелян, В. И. Коробко. - 2-е изд., стер. - М.: Академия, 2006. - 240 с.
6. Теплотехника [Текст]: учебник / Под ред. В. Н. Луканина. - 4-е изд., испр. - М.: Высшая школа, 2003. - 671 с.



## ПРИЛОЖЕНИЯ

### Приложение А

Таблица П.1 – Физические свойства сухого воздуха при давлении  
 $P=1,013 \cdot 10^3$  Па

$t$ , °C	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup> .	$C_p$ , кДж/(кг·К)	$\lambda$ , Вт/(м·К)	$\nu \cdot 10^6$ , м <sup>2</sup> /с	Pr
-50	1,584	1,013	0,0204	9,23	0,728
-40	1,515	1,013	0,0212	10,04	0,728
-30	1,453	1,013	0,0220	10,80	0,723
-20	1,395	1,009	0,0228	11,79	0,716
-10	1,342	1,009	0,0236	12,43	0,712
0	1,293	1,005	0,0244	13,28	0,707
10	1,247	1,005	0,0251	14,16	0,705
20	1,205	1,005	0,0259	15,06	0,703
30	1,165	1,005	0,0267	16,00	0,701
40	1,128	1,005	0,0276	16,96	0,699
50	1,093	1,005	0,0283	17,95	0,698
60	1,060	1,005	0,0290	18,97	0,696
70	1,029	1,009	0,0296	20,02	0,694
80	1,000	1,009	0,0305	21,09	0,692
90	0,972	1,009	0,0313	22,10	0,690
100	0,946	1,009	0,0321	23,13	0,688
120	0,898	1,009	0,0334	25,45	0,686
140	0,854	0,013	0,0349	27,80	0,684
160	0,815	1,017	0,0364	30,09	0,682
180	0,779	1,022	0,0378	32,49	0,681
200	0,746	1,026	0,0393	34,85	0,680
250	0,674	1,038	0,0427	40,61	0,677
300	0,615	1,047	0,0460	48,33	0,674
350	0,566	1,059	0,0491	55,46	0,678
400	0,524	1,068	0,0521	63,09	0,678
500	0,456	1,093	0,0574	79,38	0,687
600	0,404	1,114	0,0622	96,89	0,699
700	0,362	1,135	0,0671	115,4	0,706
800	0,329	1,156	0,0718	134,8	0,713

## Приложение Б

Таблица П.2 – Физические свойства воды на линии насыщения

t, °C	$P \cdot 10^{-5}$ , Па	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$c_p$ , кДж/(кг·К)	$\lambda$ , Вт/(м·К)	$\nu \cdot 10^6$ , м <sup>2</sup> /с	$\beta \cdot 10^4$ , К <sup>-1</sup>	$P_T$
0	1,013	999,9	4,212	0,55	1,789	-0,63	13,67
10	1,013	999,7	4,191	0,57	1,306	0,70	9,52
20	1,013	998,2	4,183	0,60	1,006	1,82	7,02
30	1,013	995,7	4,174	0,62	0,805	3,21	5,42
40	1,013	992,2	4,174	0,64	0,659	3,87	4,31
50	1,013	988,1	4,174	0,65	0,556	4,49	3,54
60	1,013	983,2	4,179	0,66	0,478	5,11	2,98
70	1,013	977,8	4,187	0,67	0,415	5,70	2,55
80	1,013	971,8	4,195	0,67	0,365	6,32	2,21
90	1,013	965,3	4,208	0,68	0,326	6,95	1,95
100	1,013	958,4	4,220	0,68	0,295	7,52	1,75
110	1,43	951,0	4,233	0,69	0,272	8,08	1,60
120	1,98	943,1	4,250	0,69	0,252	8,64	1,47
130	2,70	934,8	4,266	0,69	0,233	9,19	1,36
140	3,61	926,1	4,287	0,69	0,217	9,72	1,16
150	4,76	917,0	4,313	0,68	0,203	10,3	1,17
160	6,18	907,4	4,346	0,68	0,191	10,7	1,10
170	7,92	897,3	4,380	0,68	0,181	11,3	1,05
180	10,03	886,9	4,417	0,67	0,173	11,9	1,00
190	12,55	876,0	4,459	0,67	0,165	12,6	0,96
200	15,55	863,0	4,505	0,66	0,158	13,3	0,9
210	19,08	852,8	4,555	0,66	0,153	14,1	0,9
220	23,20	840,3	4,614	0,65	0,148	14,8	0,89
230	27,98	827,3	4,681	0,64	0,145	15,9	0,88
240	33,48	813,6	4,756	0,63	0,141	16,8	0,87
250	39,78	799,0	4,844	0,62	0,137	18,1	0,86
260	46,94	784,0	4,949	0,61	0,135	19,7	0,87
270	55,05	767,9	5,070	0,59	0,133	21,6	0,88
280	64,19	750,7	5,230	0,57	0,131	23,7	0,90
290	74,45	732,3	5,485	0,56	0,129	26,2	0,93
300	85,92	712,5	5,736	0,54	0,128	29,2	0,97
320	112,90	667,1	6,574	0,51	0,128	38,2	1,11

## Приложение В

Таблица П.3 – Степень черноты различных металлов

Наименование материала	t, °C	$\varepsilon$
Алюминиевая краска	-	0,50
Алюминий полированный	50÷500	0,04÷0,06
Алюминий с шероховатой поверхностью	20÷50	0,06÷0,07
Асбестовый картон	20	0,96
Жесть белая старая	20	0,28
Железо оцинкованное	30	0,23
Кирпич красный шероховатый	20	0,88÷0,93
Лак черный матовый	40÷100	0,96÷0,98
Лак белый	40÷100	0,80÷0,95
Латунь полированная	200	0,03
Латунь листовая прокатная	20	0,06
Масляная краска	-	0,94
Медь окисленная	500	0,88
Медь полированная	50÷1000	0,02
Снег	-	0,96
Сталь окисленная	-	0,80
Сталь полированная	-	0,54
Сталь с шероховатой поверхностью	50	0,56
Стекло	250÷1000	0,87÷0,72
Хром полированный	-	0,17
Чугун шероховатый	-	0,96
Эмаль белая	20	0,90