

Документ подписан простой электронной подписью
Информация о владельце:
ФИО: Емельянов Сергей Геннадьевич
Должность: ректор
Дата подписания: 16.08.2022 10:30:37
Уникальный программный ключ:
9ba7d3e34c012eba476ffd2d064cf2781953be730df2374d16f3c0ce536f0fc6

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

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

Кафедра теплогазоводоснабжения



Основы теплоснабжения и вентиляции

Методические указания для лабораторных занятий студентов,
обучающихся по направлению подготовки 08.03.01 Строительство

Курск 2017

УДК 697

Составитель Н.С. Кобелев, С.В. Павлов

Рецензент

Доктор технических наук, профессор В.С. Ежов

Основы теплоснабжения и вентиляции: методические указания для лабораторных занятий студентов очной и заочной форм обучения, обучающихся по направлению подготовки 08.03.01 Строительство / Юго-Зап. гос. ун-т; сост. Н.С. Кобелев, С.В. Павлов - Курск, 2017 - 41 с. - Библиогр.: с. 41.

В методических указаниях приведены материалы для проведения лабораторных занятий по основам теплоснабжения и вентиляции.

Методические указания для лабораторных занятий предназначены для студентов, обучающихся по направлению подготовки 08.03.01 Строительство

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать 2017 г. Формат 60x84 1/16.
Усл. печ. л. Уч.-изд.л. Тираж 30 экз. Заказ _____. Бесплатно.
Юго-Западный государственный университет.
305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

Содержание

Лабораторная работа №1.....	4
Лабораторная работа №2.....	16
Лабораторная работа №3.....	20
Лабораторная работа №4.....	27
Лабораторная работа №5.....	32
Библиографический список.....	41

Лабораторная работа №1

Приборы для определения температуры, давления и расхода теплоносителя

Целью работы: формирование у студентов навыков работы с измерительными приборами.

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).

Ртутные термометры применяются для измерения температур от -35 до ± 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.

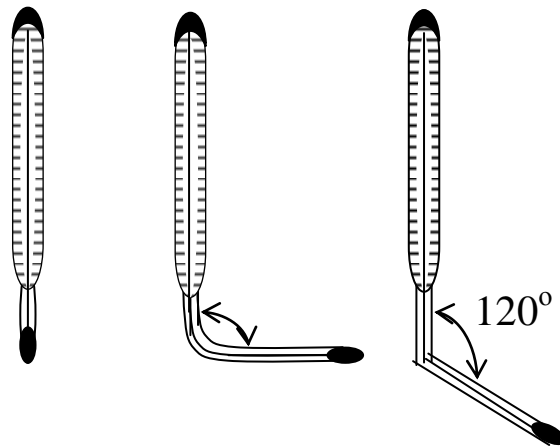


Рис.1. Термометры жидкостно-стеклянные

Спиртовые термометры применяются для измерения невысоких температур до $+100$ °С.

Достоинства: широкий интервал измерения температур, деше-

визна, 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.

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

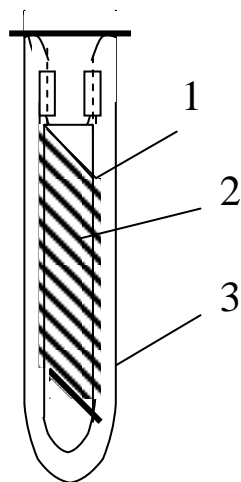


Рис. 2 Платиновый термометр

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

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.

Конструкция платинового термометра сопротивления приведена на рис.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 спаев двух разнородных проводников. Термопара представляет собой два разнородных проводника, составляющих общую электрическую цепь (Рис. 3). 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. 4). Обычно градуировка термопар производится при температуре холодных спаев термопары, равной 0°C . По результатам градуировки составляются градуировочные кривые $t=E(t,t_0)$ или таблицы (табл.1). Если при измерении температуры среды, имеющей $t^\circ\text{C}$, температура холодных спаев отличается

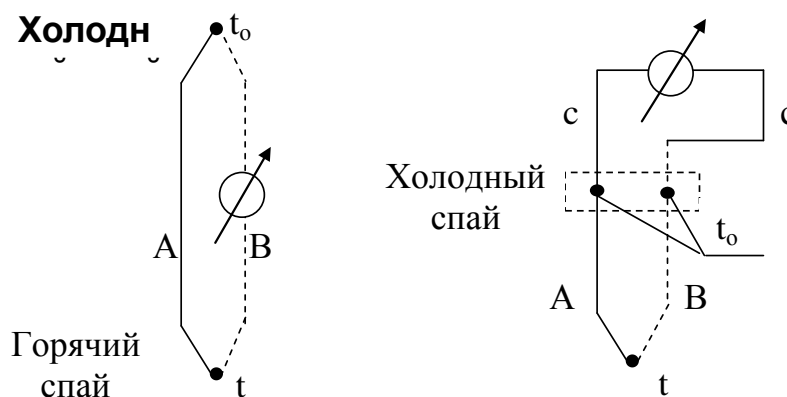


Рис. 3 Схемы электрических цепей

от 0°C и равна t_0 , то значение термо-э.д.с. $E(t, 0)$, по которому находят искомое значение температуры t , определяется по формуле

$$E(t,0)=E(t,t_0)+E(t_0,0),$$

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 по температуре t , равной t_0 °С.

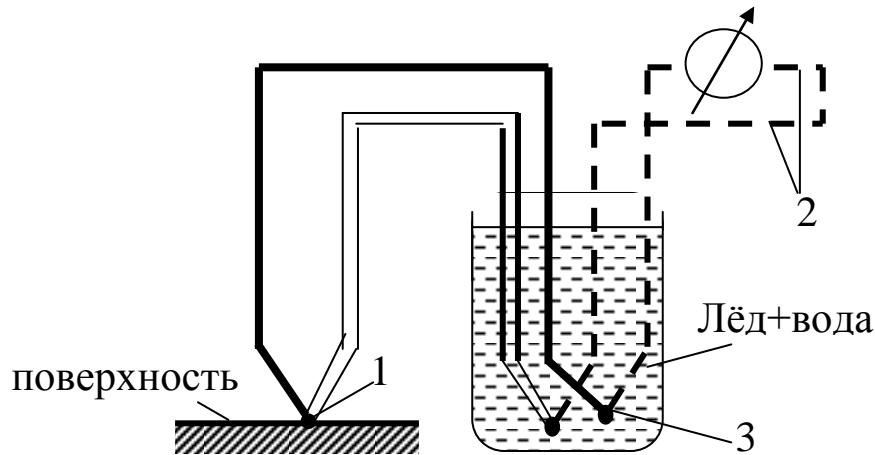


Рис. 4 Схема подключения термопары к измерительному прибору
1- горячий спай; 2-медные провода; 3 – холодный спай

Для изготовления термопар применяют целый ряд материалов: платина-платинородий, хромель-алюмель, хромель-копель, железо-константан, медь-константан, вольфрам, молибден и другие материалы. Пределы измерения температур стандартными термопарами представлены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристика стандартных термопар

Наименование термопары	Тип	Термо-э.д.с. $t_0=0^{\circ}\text{C}$, $t=100^{\circ}\text{C}$	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 ₂)-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 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 $1\text{ кгс}/\text{м}^2$ ($1\text{ кг}/\text{см}^2$) - техническая атмосфера.

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

$$p = \rho gh,$$

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

h - высота столба жидкости, м;

ρ - плотность жидкости, кг/м³;

g - ускорение силы тяжести в точке измерения, м/с².

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 °С и ускорении силы тяжести 9,80665 м/с², 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.

$$P_B = P_6 - P.$$

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 кг/см^2) и разрежений.

2.1.1. U-образный манометр (вакуумметр)

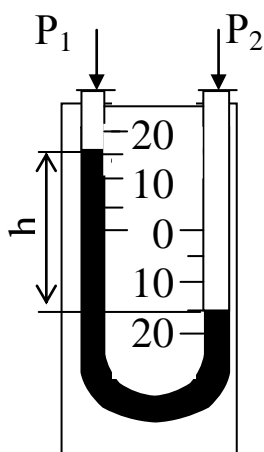


Рис. 5. U-образный жидкостной манометр

Манометр состоит из U-образной трубки (Рис.5) со шкалой. 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, т.е. $P_1 - P_2 = h$ мм ст. жидкости.

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

2.1.1. Микроманометры

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

$$P = \ell \cdot \sin \alpha,$$

где P - давление, мм столба жидкости;

ℓ - длина столба рабочей жидкости в наклонной трубке, мм;

α - угол наклона трубки к горизонтали.

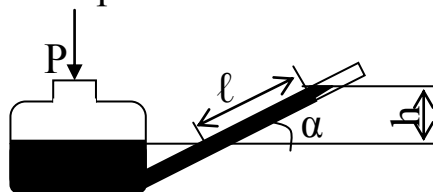


Рис. 6 Схема микроманометра с наклонной трубкой

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 находят 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

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

где ℓ - 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.7) служит изогнутая стальная или латунная трубка (трубчатая пружина). Одним концом она впаяна в штуцер, которым манометр присоединяется к сосуду, где требуется измерить давление. Трубка 1 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.8). Мембранные приборы нашли широкое применение при измерении низких давлений и разрежений, в тягомерах и напорометрах.

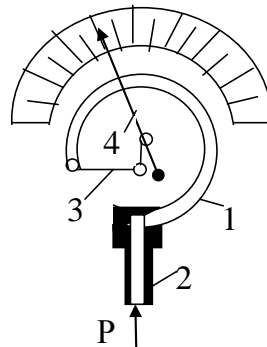


Рис. 7. Манометр с трубчатой пружиной

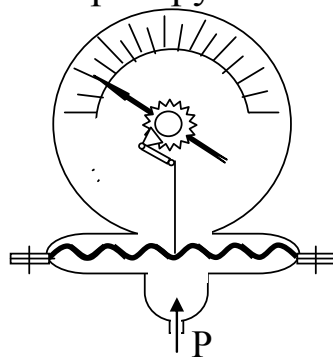


Рис. 8. Схема мембранного манометра

3. Измерение скорости и расхода жидкостей

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.

Счетчики 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 счетчики 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. 9.

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

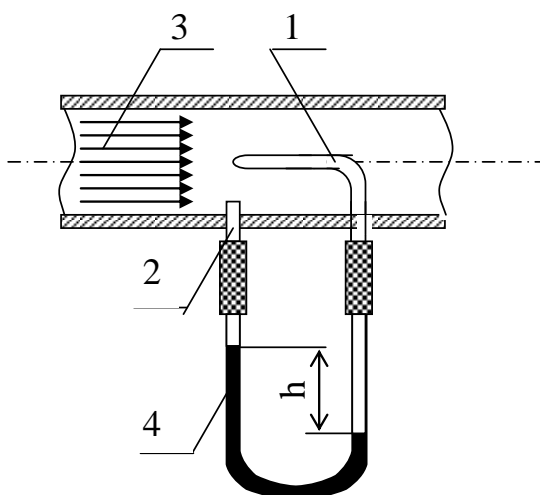


Рис. 9. Схема замера динамического давления

1- трубка полного давления; 2 – трубка для отбора статического напора; 3 – измеряемый поток; U – образный манометр

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

$$P_d = P_{\Pi} - P_{\text{ст}} = \frac{\rho w^2}{2g},$$

где w - скорость движения среды, м/с;

ρ - плотность среды, кг/м³;

g - ускорение силы тяжести, м/с²;

P_d - динамическое давление, кг/м².

Отсюда скорость потока

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

Т.к. разность давлений:

$$P_{\Pi} - P_{\text{ст}} = h(\rho_{\text{ж}} - \rho_{\Gamma}),$$

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

$\rho_{\text{ж}} - \rho_{\Gamma}$ - соответственно плотности рабочей жидкости в дифманометре и вещества, находящегося над рабочей жидкостью, кг/м³, то

$$w = \sqrt{\frac{2g}{\rho} h(\rho_{\text{ж}} - \rho_{\Gamma})}.$$

Отчет по работе должен содержать:

1. Краткое описание работы.
2. Схемы приборов.

Лабораторная работа №2

Определение теплоемкости влажного воздуха

Цель работы: освоение способом определения теплоемкости методом протока.

Теоретическая часть

Теплоемкостью называется количество теплоты, которое нужно подвести или отвести от тела, чтобы изменить его температуру на 1 градус (1°C или 1 K).

Если теплоемкость относят к 1 кг газа, то ее принято называть массовой теплоемкостью и обозначать буквой c , Дж/(кг·К).

Если теплоемкость относят к 1 м^3 (взятому при нормальных физических условиях: $p=101325\text{ Па}$, $T=273,15\text{ К}$) или к 1 кмолью газа, то ее называют соответственно объемной или мольной и обозначают c' Дж/($\text{м}^3\cdot\text{К}$) и μc Дж/(кмоль·К). Теплоемкости c , c' и μc связаны между собой соотношениями:

$$c = \mu c / \mu = c' / \rho; \quad c' = \rho \cdot c = \mu c / 22,4; \quad \mu c = \mu \cdot c = c' \cdot 22,4, \quad (1)$$

где μ – молекулярная масса газа, кг/кмоль;

ρ – плотность газа при нормальных физических условиях, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Теплоемкость газов зависит от температуры и в общем случае может быть представлена квадратичной зависимостью, т.е.

$$c = dq/dt = a + b \cdot t + d \cdot t^2,$$

где $c = dq/dt$ – истинная массовая теплоемкость газа при температуре t ; a , b и d – опытные константы, зависящие от природы газа и характера процесса.

Теплоемкость газа в каком-либо интервале температур t_1 и t_2 называется средней теплоемкостью и обозначается $[c]_{t_1}^{t_2}$

$$[c]_{t_1}^{t_2} = \frac{q}{t_2 - t_1} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} c dt}{t_2 - t_1}, \quad (2)$$

где q – количество теплоты, затраченное для нагрева газа от температуры t_1 до температуры t_2 .

В теплотехнике широко используют теплоемкость газа в изохорном и изобарном процессах, т.е. c_v и c_p .

Всегда $c_p > c_v$, а для идеальных газов

$$c_p - c_v = R \quad \text{и} \quad c_p / c_v = k, \quad (3)$$

где R – индивидуальная газовая постоянная, Дж/(кг·К);

k – показатель адиабатного процесса, который зависит от атомности газа. Для одноатомных газов $k = 1,67$, для 2-х атомных $k = 1,4$, а для 3-х и более атомных $k = 1,3$.

Описание установки и методики эксперимента

Схема экспериментальной установки показана на рис. 1. Протекание воздуха через стеклянную трубу 1 обеспечивается вентилятором 3. Исследуемый воздух засасывается из помещения лаборатории, проходит через газовый счетчик 4 и трубу, в которой расположен электрический нагреватель 2. Мощность нагревателя регулируется при помощи ЛАТРа 9 и измеряется ваттметром 8. Температура воздуха на входе в газовый счетчик измеряется жидкостно-стеклянным термометром. Нагрев воздуха определяется с помощью медь-константановой дифференциальной термопары, холодный спай 5 которой расположен до нагревателя, а горячий спай 6 – за нагревателем. Электродвижущая сила термопары измеряется с помощью переносного потенциометра 7.

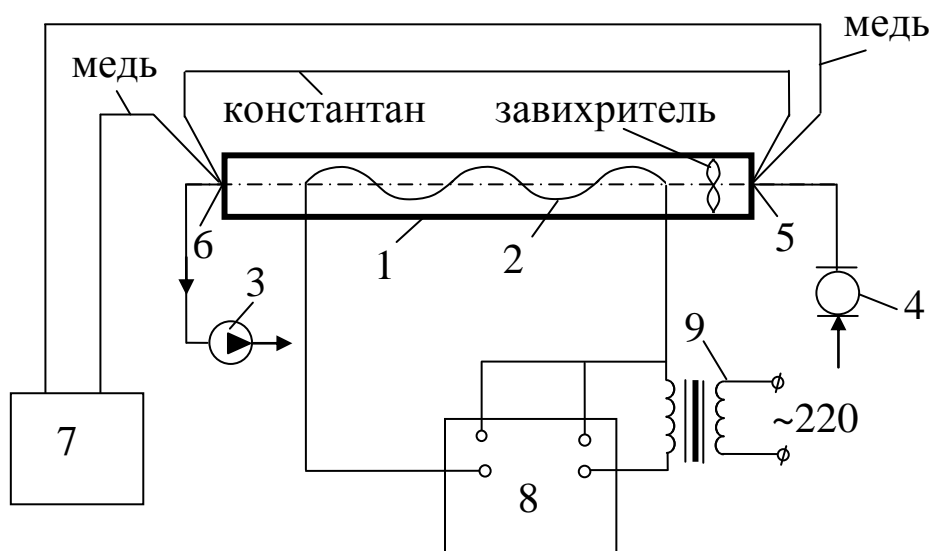


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Проведение опыта и обработка результатов измерений

Установку включает и выключает преподаватель или лаборант. Сначала включить вентилятор, а потом электрический нагреватель. Перед включением нагревателя необходимо повернуть ручку ЛАТРа против часовой стрелки до отказа, что будет соответствовать нулевому напряжению на выходе из ЛАТРа. Включить ЛАТР в

электрическую сеть и при его помощи установить мощность нагревателя 50÷100 Вт (20-40 делений по шкале ваттметра, если предел по напряжению 100 В, а по току 2,5 А). Жидкостно-стеклянным термометром измерить температуру воздуха t_0 на входе в газовый счетчик.

Все замеры производить через 7-10 мин после включения установки. При помощи секундомера измерить время прохождения через установку ΔV м³ воздуха. После чего можно определить секундный массовый расход воздуха через установку G (кг/с) по формуле:

$$G = \rho \cdot \Delta V / \tau, \quad (4)$$

где τ – время прохождения через установку ΔV м³ воздуха;
 ρ – плотность воздуха, кг/м³.

Плотность воздуха вычисляется из уравнения Клапейрона по формуле:

$$\rho = p_0 / (R \cdot T_0), \quad (5)$$

где $R = 287$ Дж/(кг·К) – индивидуальная газовая постоянная воздуха;
 p_0 – давление атмосферного воздуха, Па;
 T_0 – абсолютная температура атмосферного воздуха, К,

$$T_0 = 273 + t_0; \quad (6)$$

Измеряем значение э.д.с. дифференциальной термопары E , mV и определяем по формуле, на сколько нагрелся воздух при прохождении через трубу, °С:

$$\Delta t = 24,5 \cdot E, \quad (7)$$

где 24,5 – переводной коэффициент милливольт в градусы для медь-константановой термопары.

Затем из уравнения: $Q = G \cdot c_p \cdot \Delta t$ (8)

определим массовую изобарную теплоемкость c_p (Дж/кг·К) воздуха

$$c_p = 0,98 \cdot Q / (G \cdot \Delta t), \quad (9)$$

где 0,98 – коэффициент, учитывающий потери тепла поверх-ностью стеклянной трубки в окружающую среду;

Q – мощность электронагревателя, Вт.

Результаты измерений занести в таблицу.

Таблица опытных данных

Номера замеров	Q , Вт	ΔV , м ³	τ , с	P_0 , Па	t_0 , °С	E , mV

Отчет по работе должен содержать:

1. Краткое описание работы.
2. Схему установки.
3. Протокол записи показаний измерительных приборов.
4. Обработку результатов опыта.

Вопросы для самопроверки

1. Определение теплоемкости, размерность.
2. Виды теплоемкости.
3. Схема экспериментальной установки и порядок проведения работы.

Лабораторная работа №3

Исследование коэффициента теплопроводности отопительного прибора

Цель работы заключается в определении коэффициента теплопередачи отопительного прибора.

Основные теоретические сведения.

Важнейшей теплотехнической характеристикой отопительного прибора является поверхностная плотность теплового потока q , Вт/м², т.е. количество тепловой энергии подаваемой от теплоносителя воздуху отапливаемого помещения через 1 м² теплообменной поверхности прибора.

Разработанный новый тип отопительного прибора или модернизированный подвергается испытанию с целью определения его поверхностной плотности в специальных климатических камерах по определенной методике.

Согласно этой методике отопительные приборы испытываются при стандартных условиях:

- средней разности температур теплоносителя и окружающей среды $\Delta t_{cp} = 70$ °С;
- барометрическом давлении в испытательной камере 101,33 кПа;
- расходе теплоносителя через прибор $G_{пр} = 360$ кг/ч;
- при одностороннем подключении прибора по схеме «сверху – вниз».

Полученная таким образом тепловая характеристика прибора называется номинальной плотностью теплового потока $q_{ном}$, Вт/м². Зная ее легко может быть определен коэффициент теплопередачи, т.е. тепловой поток, проходящий через 1 м² поверхности нагрева прибора при разности средней температуры теплоносителя и воздуха помещения в 1 °С:

$$K_{ном} = q_{ном} / 70 \quad (1)$$

По этим величинам прибор сравнивается с другими известными типами и, таким образом, оценивается его совершенство.

Приборы также испытываются при внедрении новых режимов их эксплуатации.

В реальных условиях работы отопительных приборов расход теплоносителя, средняя разность температур, способ подключения приборов к теплопроводам и ряд других факторов, влияющих на их

теплопередачу, как правило, не совпадают с теми, при которых проводились испытания. Для учета перечисленных факторов осуществляют пересчет фактической плотности теплового потока прибора, q_f , через номинальную

$$q_f = q_{ном} \cdot \left[\frac{\Delta t_{cp}}{70} \right]^{1+n} \cdot \left[\frac{G_{пр}}{360} \right]^p \cdot c \cdot b \quad (2)$$

$$\Delta t_{cp} = \left[\frac{t_{вх} + t_{вых}}{2} - t_{в} \right] - \text{средний температурный напор, } ^\circ\text{C};$$

$t_{вх}$ – температура теплоносителя на входе в отопительный прибор, $^\circ\text{C}$;

$t_{вых}$ – температура теплоносителя на выходе из отопительного прибора, $^\circ\text{C}$;

$t_{в}$ – температура воздуха отапливаемого помещения, $^\circ\text{C}$;

$G_{пр}$ – расход теплоносителя через прибор, кг/ч;

n, p, b, c – экспериментальные поправочные коэффициенты.

Описание лабораторной установки

Типовой комплект учебного оборудования «Энергосберегающие технологии» предназначен для изучения эффективности энергосбережения и обеспечения теплом зданий и сооружений.

Комплект оборудования состоит из двух модулей:

- «Стенд - тепловой пункт»;
- «Стенд-потребитель».

Модуль «Стенд - тепловой пункт» представляет собой рамную напольную конструкцию с размещенным на ней котлом, насосной станцией подачи теплоносителя в систему, панелью управления и контроля, где смонтированы контрольно-измерительные приборы и направляющая аппаратура.

Модуль «Стенд - потребитель» представляет собой рамную напольную конструкцию, на которой установлена камера с принудительной вентиляцией, с тремя типами отопительных приборов с трубопроводами и распределительной аппаратурой.

Камера позволяет осуществлять более быстрый отвод тепла от приборов при подготовке к проведению лабораторных работ. Измерение теплоотдачи осуществляется в динамическом режиме с пересчетом к стандартным условиям испытаний.

Система подключения отопительных приборов позволяет изучать различные схемы включения приборов: частичная подача теплоносущей среды в прибор, полная подача, обводные схемы включения, изменение схем включения замыкающих участков.

Информационно-измерительная система позволяет определять давления в различных точках системы, расходы, время, температуру теплоносителя и воздуха, электрическую и тепловую мощность.

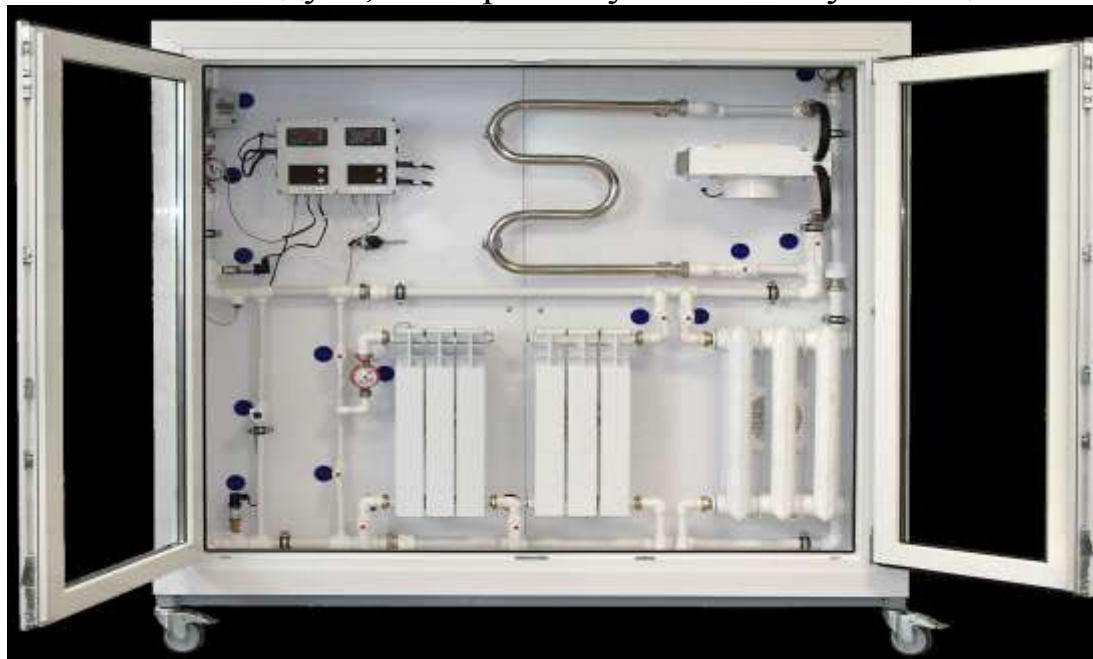


Рис. 1 –Общий вид модуля «Стенд-потребитель»

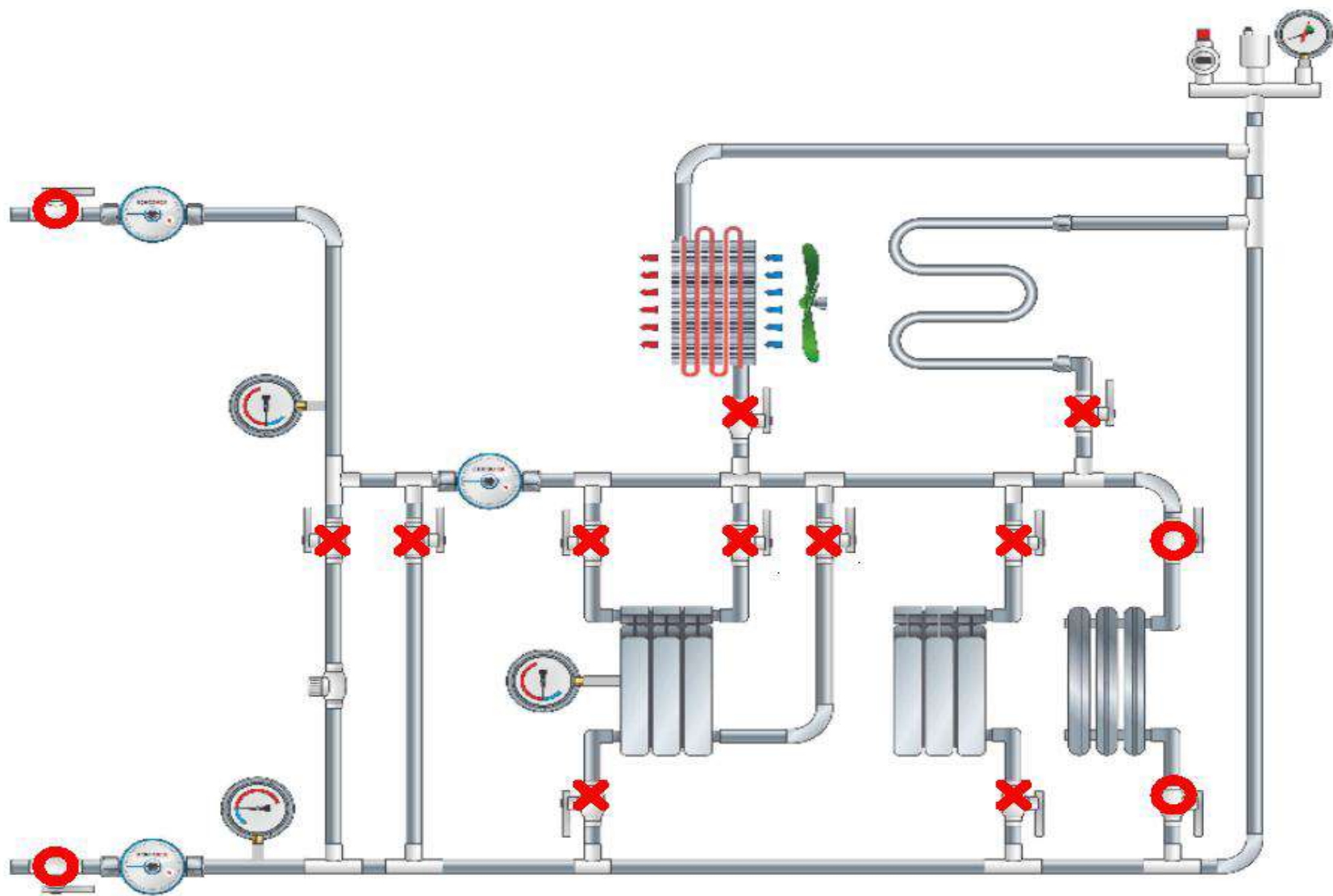


Рис. 2 Гидравлическая схема для экспериментального определения коэффициента теплоотдачи радиатора

Порядок проведения работы

Определение коэффициента теплоотдачи отопительных приборов выполняется на экспериментальном стенде при:

1. Различных массовых расходах $G_1=XX$ [кг/с], $G_2=XX$ [кг/с], $G_3=XX$ [кг/с] и постоянном значении температуры потока $t_1=80^\circ\text{C}$.

2. При различных значениях температуры теплоносителя $t_1=60^\circ\text{C}$, $t_2=70^\circ\text{C}$, $t_3=80^\circ\text{C}$ при постоянном массовом расходе G_1 .

Запись показаний происходит каждые 15 минут в течении 60 минут работы экспериментального стенда.

Тепловая энергия определяется из уравнения теплового баланса:

$$Q = G \cdot C_p \cdot (t_{\text{вых}} - t_{\text{вх}}) \quad \text{Вт} \quad (1)$$

где G – массовый расход теплоносителя через радиатор;

C_p - теплоемкость жидкости при постоянном давлении (справочная величина,

$C_p = f(T)$, значение C_p - определяется по средней температуре потока на входе и выходе);

$t_{\text{вх}}$ – температура теплоносителя на входе в радиатор;

$t_{\text{вых}}$ – температура теплоносителя на выходе из радиатора.

Плотность теплового потока определяется выражением:

$$q_f = Q/F, \text{ Вт/м}^2 \quad (2)$$

где F – площадь поверхности радиатора (см. технические характеристики радиатора).

Местный коэффициент теплоотдачи определяется по закону Ньютона-Рихмана:

$$K = q_f / [0,5(t_{\text{вх}} + t_{\text{вых}}) - t_{\text{в}}], \text{ Вт/ м}^2 \times ^\circ\text{C}. \quad (3)$$

где $t_{\text{в}}$ - температура окружающей среды.

Перед началом проведения лабораторной работы необходимо настроить гидравлическую схему модуля «Стенд-потребитель» согласно рис.1.

Далее в табл.1 записываются показания расхода через радиатор и датчиков температуры потока на входе и выходе, температур наружной стенки радиатора, температуры окружающей среды, производятся вычисления по формулам (1-3). Полученные локальные коэффициенты теплоотдачи в результате

экспериментального исследования усредняются и сравниваются с техническими характеристиками заявленными производителем радиаторов.

Обработка результатов испытания

Таблица 1 -Протокол результатов измерения

№	G, [кг/с]	t _{вх} , °С	t _{вых} , °С	t _{вых} , °С	t _в , °С
1					
2					
3					

где F – площадь поверхности нагрева отопительного прибора, м² (на лабораторном стенде прибор – алюминиевый колончатый радиатор типа Rifar, F = 0,73 м²).

1. Коэффициент теплопередачи
2. Определяют q и K.

По справочным данным (табл.1), зная фактический расход теплоносителя и средний температурный напор, и сравнивают с полученными экспериментально.

Дается оценка полученных результатов.

Таблица 2-Тепловая мощность алюминиевого колончатого радиатора типа Rifar

Δt _{ср}	Мощность прибора Q, Вт, в зависимости от расхода теплоносителя G, кг/ч						
	26	50	100	150	200	250	300
30	180	191	205	215	220	225	230
40	266	285	304	316	327	333	339
50	360	383	412	428	440	451	459
60	457	490	523	545	561	575	585
70	558	597	640	666	687	701	713
80	667	725	775	807	819	853	865

Отчет по работе должен содержать:

1. Краткое описание работы.
2. Схему установки.
3. Протокол результатов измерения.
4. Обработку результатов опыта.

Вопросы для самопроверки

1. Что называется поверхностной плотностью теплового потока отопительного прибора?
2. Что такое коэффициент теплопередачи отопительного прибора?
3. От каких основных факторов зависит коэффициент теплопередачи?
4. Какие виды т/о включает процесс переноса тепла от энергоносителя к воздуху отапливаемого помещения?
5. Какие параметры влияют коэффициент теплоотдачи отопительного прибора?
6. Влияние массового расхода через отопительный прибор на коэффициент теплоотдачи?
7. Влияние температуры потока на коэффициент теплоотдачи?

Лабораторная работа №4

Исследование коэффициента теплоотдачи в горизонтальной трубе

Целью работы является исследования процесса определения коэффициента теплоотдачи.

Задание

1. Определить опытным путём коэффициент теплоотдачи конвекцией от горизонтальной трубы к воздуху.
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:

$$Q_k = \alpha_k \cdot F \cdot (t_w - t_f), \quad (1)$$

где Q_k – тепловой поток, отдаваемый конвекцией, Вт;

F – поверхность трубки, м²;

t_w – температура поверхности трубки, °С;

t_f – температура воздуха вдали от трубки, °С;

α_k – коэффициент теплоотдачи конвекцией, Вт/(м²·К).

Коэффициент теплоотдачи α_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 α_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 α_k вызывает большие затруднения.

Из опыта можно найти коэффициент теплоотдачи α_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):

$$Nu = \alpha_k \cdot \ell / \lambda_f, \quad (2)$$

где α_k – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К);

ℓ – определяющий размер поверхности теплообмена, м;

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

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

$$Pr = (\nu \cdot \rho \cdot c_p) / \lambda = \nu / a, \quad (3)$$

где ρ – плотность, кг/м³;

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

a – коэффициент температуропроводности, м²/с;

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

ν – 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:

$$\text{Gr} = (g \cdot \beta \cdot \ell^3 \cdot \Delta t) / \nu^2, \quad (4)$$

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

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

ℓ – определяющий размер поверхности теплообмена, м ;

Δt – разность температур поверхности тела и жидкости, К .

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

$$\text{Re} = w \cdot \ell / \nu, \quad (5)$$

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

ℓ – определяющий размер, 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:

$$\text{Nu} = f(\text{Re}, \text{Pr}, \text{Gr}, \dots). \quad (6)$$

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

$$\text{Nu} = C \cdot (\text{Gr} \cdot \text{Pr})^n, \quad (7)$$

где C и n – постоянные опытные величины.

Описание опытной установки

Опытная установка (рис. 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 °С. Торцы трубки защищены тепловой изоляцией 11.

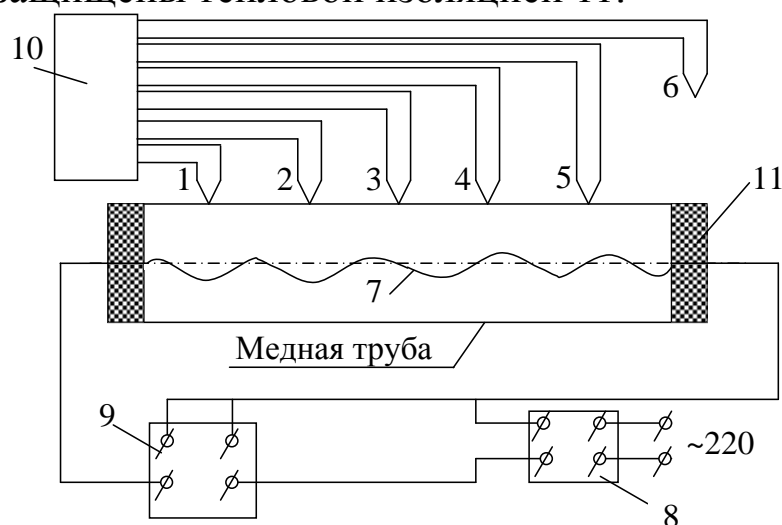


Рис. 1. Опытная установка

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 1. Производят три записи показаний термопар, делая интервал между записями 1-2 мин.

Таблица 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						
Мощность электрического нагревателя $Q =$						Вт.

Обработка результатов опыта

1. Определение α_k опытным путем.

1.1. Определяется средняя температура поверхности трубки t_w , °С:

$$t_w = (t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5) / 5, \quad (8)$$

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

1.2. Вычисляется поверхность трубки F , м^2 :

$$F = \pi \cdot d \cdot \ell, \quad (9)$$

где d – диаметр трубки, м ; ℓ – 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

$$Q = Q_{\text{л}} + Q_{\text{к}}. \quad (10)$$

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

$$Q_{\text{л}} = \varepsilon \cdot C_0 \cdot F \cdot \{[(273+t_w)/100]^4 - [(273+t_f)/100]^4\}, \quad (11)$$

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

$$Q_{\text{к}} = Q - Q_{\text{л}}. \quad (12)$$

1.5. Вычисляется коэффициент теплоотдачи $\alpha_{\text{к}}$, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ из уравнения Ньютона-Рихмана (1):

$$\alpha_{\text{к}} = Q_{\text{к}}/[F(t_w - t_f)]. \quad (13)$$

Таблица 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

Отчет по работе должен содержать:

1. Краткое описание работы.
2. Схему установки.
3. Протокол записи показаний измерительных приборов.
4. Обработку результатов опыта.

Контрольные вопросы

1. Что такое теплоотдача? Основное уравнение теплоотдачи.
2. Коэффициент теплоотдачи, физический смысл, размерность.

Лабораторная работа №5

Исследование коэффициента теплоотдачи 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".

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 1):

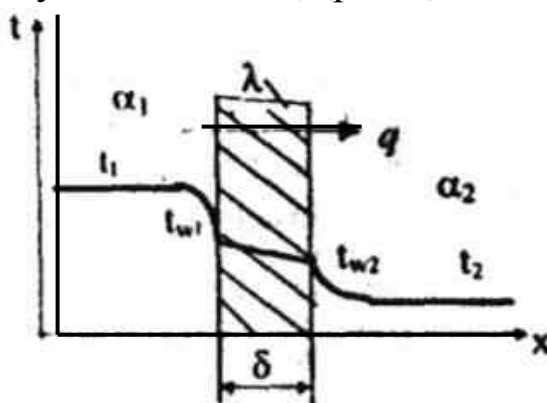


Рис.1. Распределение температур по нормали к поверхности теплопередачи

1) теплоотдача между горячим теплоносителем и поверхностью стенки:

$$q = \alpha_1 \cdot (t_1 - t_{w1}) \quad (1)$$

2) теплопроводность через стенку:

$$q = \frac{\lambda}{\delta} \cdot (t_{w1} - t_{w2}) \quad (2)$$

3) теплоотдача от поверхности стенки к холодному теплоносителю:

$$q = \alpha_2 \cdot (t_{w2} - t_2) \quad (3)$$

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

α_1 , α_2 - коэффициенты теплоотдачи от горячего теплоносителя к стенке и от стенки к холодному теплоносителю соответственно, Вт/(м²·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 (1). (2) и (3) приводит к получению *уравнения теплопередачи*:

$$Q = k \cdot \Delta t_{cp} \cdot F, \quad (4)$$

$$q = k \cdot \Delta t_{cp}, \quad (5)$$

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

q - удельный тепловой поток (плотность теплового потока), Вт/м²;

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

$$\Delta t_{cp} = t_1 - t_2, \quad (6)$$

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

k - коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·К).

Коэффициент теплопередачи определяет интенсивность теплопередачи. Он равен количеству тепла, передаваемого в единицу времени (с) через 1 м² поверхности стенки при разности температур между горячим и холодным теплоносителями 1°С или 1 К. Определяется по формуле

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (7)$$

где α_1 , α_2 - коэффициенты теплоотдачи со стороны горячего и холодного теплоносителей, Вт/(м²·К); δ - толщина стенки, м; λ - коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К).

Величина, обратная коэффициенту теплопередачи, называется *термическим сопротивлением теплопередаче* и обозначается R , (м²·К)/Вт:

$$R = \frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}. \quad (8)$$

Формула (8) показывает, что общее термическое сопротивление равно сумме частных сопротивлений: $1/\alpha_1$, δ/λ , $1/\alpha_2$.

Если стенка не однослойная, а состоит из нескольких слоев с различной толщиной δ_1 , δ_2 , δ_3, \dots , δ_n и коэффициенты

теплопроводности этих слоев $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_n$, то коэффициент теплопередачи определяют по формуле:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (9)$$

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

Для цилиндрической стенки уравнение теплопередачи будет иметь вид

$$Q = \pi \cdot k_l \cdot \Delta t_{cp} \cdot l. \quad (10)$$

где l - длина цилиндрической стенки, м;

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

k_l - линейный коэффициент теплопередачи, Вт/(м·К), определяемый по формуле:

$$k_l = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 \cdot d_1} + \frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2 \cdot d_2}} \quad (11)$$

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 (4), (8), (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.2).

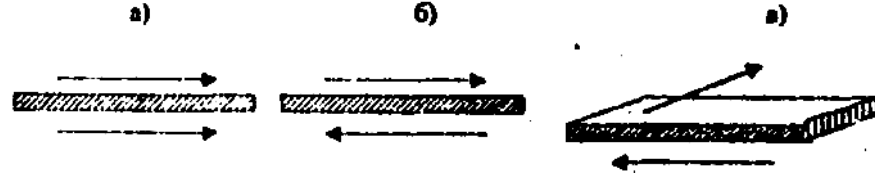


Рис.2. Схемы движения жидкостей в теплообменниках: а - прямоточная, б - противоточная, в - перекрестный ток.

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:

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

(12)

или

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

(13)

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

V_1, V_2 - объемные расходы теплоносителей, м³/с;

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

ρ_1, ρ_2 - плотности теплоносителей, кг/м³.

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

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

(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.

$$Q = k \cdot \Delta t_{cp} \cdot F, \quad (15)$$

где K - коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·°С), определяется по формуле (7).

Δt_{cp} - средний температурный напор, °С;

F - поверхность теплопередачи, м².

Средний температурный напор Δt_{cp} зависит от схемы движения теплоносителей (рис.3):

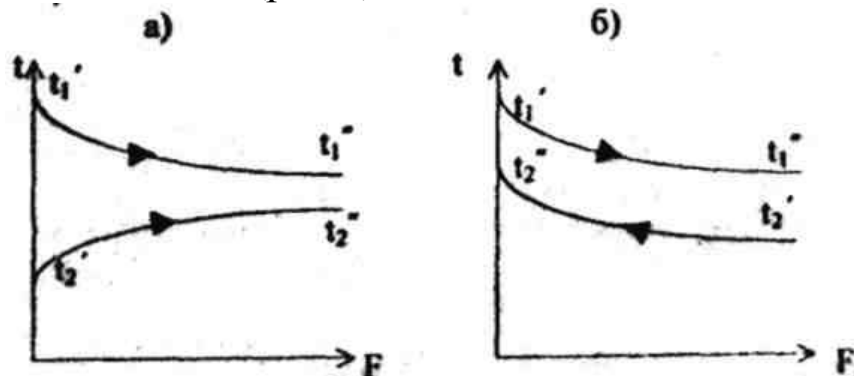


Рис.3. Изменение температур теплоносителей вдоль поверхности теплообмена при а) прямотоке и б) противотоке

Величина Δt_{cp} определяется через Δt_6 - разность температур между теплоносителями на том конце аппарата, где она больше, и Δt_m - меньшая разность температур между теплоносителями на противоположном конце аппарата.

Если $\Delta t_6 / \Delta t_m < 2$, то
$$\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_6 + \Delta t_m}{2} \quad (16)$$

Если $\Delta t_6 / \Delta t_m > 2$, то
$$\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_6 - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_6}{\Delta t_m}} \quad (17)$$

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

Описание опытной установки

Схема опытной установки представлена на рис. 4.

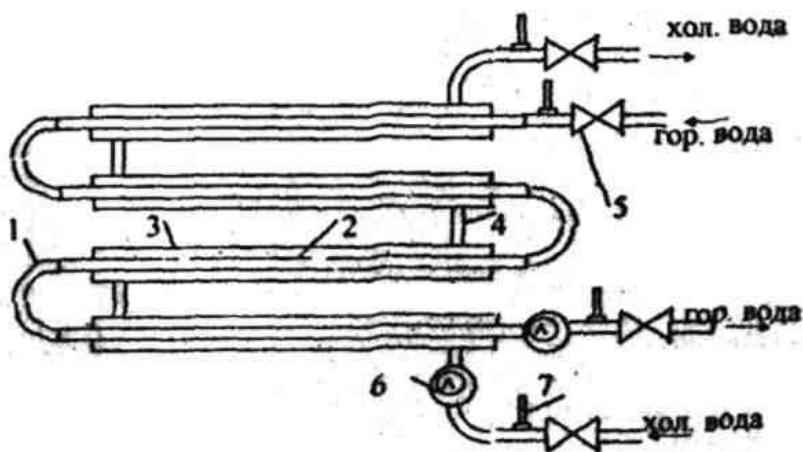


Рис. 4. Схема опытной установки

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 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. 1.

Обработка опытных данных

Таблица 1.

Протокол испытаний

Параметр	Горячий Т/Н	Холодный Т/Н	Теплообменник
Опытные данные			
Начальная температура, °С	$t_1' =$	$t_2' =$	
Конечная температура, °С	$t_1'' =$	$t_2'' =$	
Объем, м ³	$W_1 =$	$W_2 =$	
Время, с	$\tau_1 =$	$\tau_2 =$	
Расчетные параметры			
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 ² ·°С)	$\alpha_1 =$	$\alpha_2 =$	
Тепловой поток, Вт			$Q =$
Опытный коэффициент теплопередачи, Вт/(м ² ·°С)			$k_o =$
Теоретический коэффициент теплопередачи, Вт/(м ² ·°С)			$k_r =$

Опытное определение коэффициента теплопередачи

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

$$t_1 = 0,5(t_1' + t_1'') \quad \text{и} \quad t_2 = 0,5(t_2' + t_2'') \quad (18)$$

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

$$t_w = 0,5(t_1 + t_2) \quad (19)$$

3) Теплофизические свойства теплоносителей выбираются по средним температурам t_1 и t_2 , и помещаются в табл.2; критерий Pr_w выбирается по средней температуре стенки внутренней трубы t_w .

Таблица 2

Теплофизические свойства воды

Теплоноситель	t , °C	c_p , Дж/(кг·°C)	ρ , кг/м ³	ν , м ² /с	λ , Вт/(м·°C)	β , 1/К	Pr
Горячая вода	$t_1 =$						
Холодная вода	$t_2 =$						
	$t_w =$	-	-	-	-	-	$Pr_w =$

4). Поверхность теплопередачи F , м², определяем по формуле:

$$F = 4\pi \cdot d_{cp} \cdot L, \quad (20)$$

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

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

5) Среднюю разность температур Δt_{cp} определяем по схеме (рис.5) и по формулам (16) или (17):

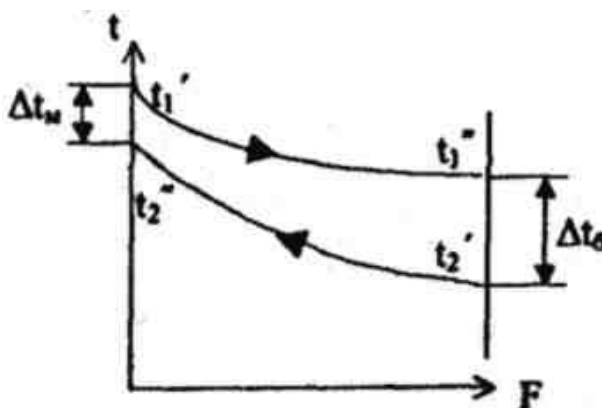


Рис.5. Схема распределения температур вдоль поверхности теплообмена при противотоке

$$\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_{\bar{b}} + \Delta t_m}{2}, \text{ если } \Delta t_{\bar{b}} / \Delta t_m < 2,$$

$$\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_{\bar{b}} - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_{\bar{b}}}{\Delta t_m}}, \text{ если } \Delta t_{\bar{b}} / \Delta t_m > 2,$$

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

Δt_m - меньшая разность температур между теплоносителями на другом конце теплообменника, °C.

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:

$$Q = [V_1 \cdot \rho_1 \cdot c_{p1} \cdot (t_1' - t_1'') + V_2 \cdot \rho_2 \cdot c_{p2} \cdot (t_2'' - t_2')] / 2 \quad (21)$$

где V_1, V_2 - объемные расходы, $\text{м}^3/\text{с}$, вычисляем $V_1 = W_1 / \tau_1$, $V_2 = W_2 / \tau_2$;

ρ_1, ρ_2 - плотности теплоносителей, $\text{кг}/\text{м}^3$;

c_{p1}, c_{p2} - теплоемкости теплоносителей, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$

7) Опытный коэффициент теплопередачи вычисляем, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$:

$$k_o = Q / (F \cdot \Delta t_{cp}) \quad (22)$$

Отчет по работе должен содержать:

1. Краткое описание работы.
2. Схему установки.
3. Протокол записи показаний измерительных приборов.
4. Обработку результатов опыта.

Вопросы для самопроверки

1. Классификация теплообменных аппаратов.
2. Уравнение теплового баланса
3. Уравнение теплопередачи.
4. Коэффициент теплопередачи. Физический смысл, формулы.
5. Схемы движения теплоносителей в теплообменных аппаратах.

Библиографический список

1. Теплотехнические измерения и приборы/Г.И.Иванова, Н.Д.Кузнецов, В.С.Чистяков. – М.: МЭИ, 2005. 450с.
2. Теплотехника: Учеб.для вузов/А.П.Баскаков, Б.В.Берг, О.К.Витт и др.; Под ред. А.П.Баскакова.-М.:ООО «ИД “Бастет”», 2010.-328с.
3. Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент: Справочник / Под общ. ред В.М.Зорина: М.: Энергоатомиздат, 1988, 560 с.
4. СП 60.13330.2012 «СНиП 41-01-2003 Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха»