

Документ подписан простой электронной подписью  
Информация о владельце:  
ФИО: Емельянов Сергей Геннадьевич  
Должность: ректор  
Дата подписания: 08.10.2022 20:47:42  
Уникальный программный ключ:  
9ba7d3e34c012eba476ffd2d064cf2781953be90fd39d00000000000000000000000

## МИНОБРАЗОВАНИЯ РОССИИ

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

Кафедра электроснабжения

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе

О.Г. Локтионова

«20» 09 2022 г.



## Общая электроэнергетика

Методические указания по выполнению практических работ по дисциплине «Общая электроэнергетика» для обучающихся направления подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»

Курск 2022

УДК 621.31

Составители: Е.В. Павлов

Рецензент

Кандидат технических наук, доцент кафедры  
«Электроснабжение»

*Д.В. Куделина*

**Общая электроэнергетика:** методические указания по выполнению практических работ по дисциплине «Общая электроэнергетика» для обучающихся направления подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» / Юго-зап. гос. ун-т; сост.: Е.В. Павлов. – Курск, 2022. – 53 с. – Библиогр.: с. 53.

Методические указания содержат рекомендации по выполнению практических работ обучающихся по дисциплине «Общая электроэнергетика». Рекомендации могут использоваться при подготовке отчетов по практическим работам, максимально облегчают подготовку к зачету.

Предназначены преподавателям и обучающимся направления подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать                      Формат 60x84 1/16.  
Усл. печ.л.                      . Уч.-изд.л.                      . Тираж 100 экз. Заказ *079*. Бесплатно.  
Юго-Западный государственный университет.

305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94

## Содержание

Практическая работа № 1 «Теплотехнические приборы и измерения».....	4
Практическая работа № 2 «Изучение изотермического процесса».....	21
Практическая работа № 3 «Определение коэффициента теплопроводности изоляционных материалов».....	26
Практическая работа № 4 «Определение изобарной теплоёмкости воздуха».....	32
Практическая работа № 5 «Определение коэффициента теплопередачи теплообменника типа «труба в трубе».....	37
Практическая работа № 6 «Исследование свойств влажного воздуха».....	47
Список использованных источников.....	53

# ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №1

## Теплотехнические приборы и измерения

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

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  $\pm 650$  °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.

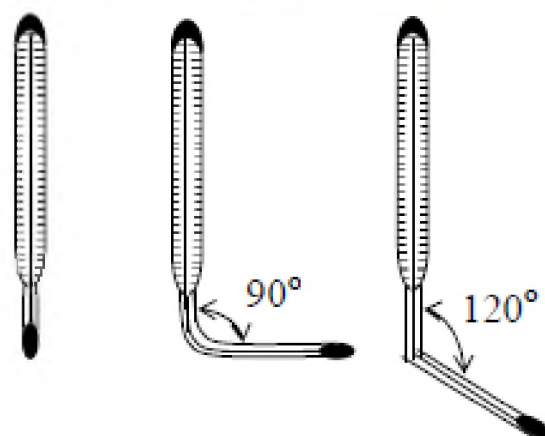


Рис.1. Термометры жидкостно-стеклянные

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

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

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

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

$\alpha$  – средний температурный

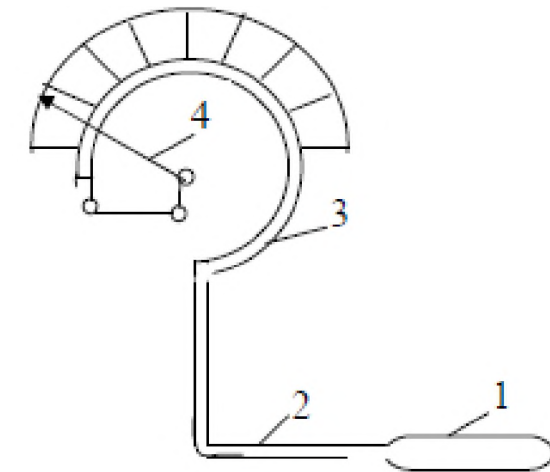


Рис.2. Схема манометрического термометра

коэффициент линейного расширения тела, град<sup>-1</sup>.

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 каче-

стве чувствительных элементов (датчиков) в сигнализаторах температуры.

Манометрические термометры основаны на использовании зависимости давления жидкости, паров или газов, заключённых в замкнутом объёме, от температуры (рис. 2). Диапазон измеряемых температур составляет  $-130 + 550$  °С.

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  $-200$  °С до  $+650$  °С.

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 темпе-

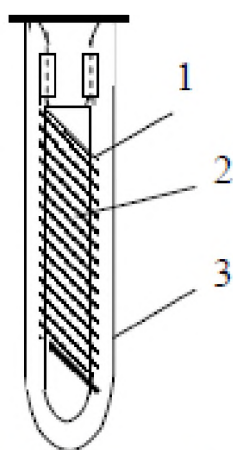


Рис. 3. Платиновый термометр сопротивления

$A$  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 спая двух разнородных проводников. Термопара представляет собой два разнородных проводника, составляющих общую электрическую цепь (Рис.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.5). Обычно градуировка термопар производится при температуре холодных спаев термопары, равной 0 °С. По результатам градуировки составляются градуировочные кривые  $t = E(t, t_0)$  или таблицы (табл.1). Если при измерении температуры среды, имеющей  $t$  °С, температура холодных спаев отличается

ратуры в интервале от 0 до +630 °С достаточно велико. Зависимость сопротивления платинового термометра  $R_t$  от температуры в интервале от 0 до +630 °С выражается уравнением

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

где  $R_t$  – сопротивление проволоки термометра при температуре  $t$  °С;

$R_0$  – сопротивление этой проволоки при температуре 0 °С;



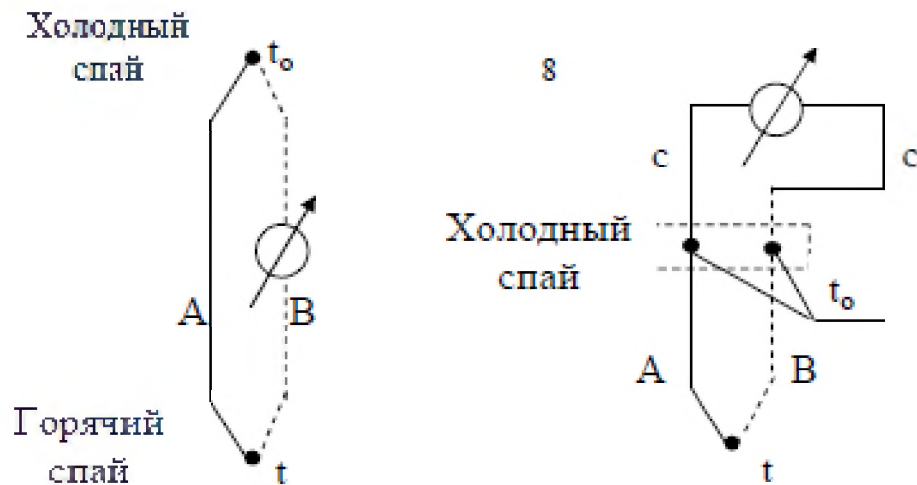


Рис.4. Схемы термоэлектрических цепей

от  $0^{\circ}\text{C}$  и равна  $t_0$ , то значение термо-э.д.с.  $E(t, 0)$ , по которому находят искомое значение температуры  $t$ , определяется по формуле

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

где  $E(t, t_0)$  - показание милливольтметра,  $\text{mV}$ ;

$E(t_0, 0)$  - поправка на температуру холодного спая, которая находится по градуировочной кривой или табл.1 по температуре  $t$ , равной  $t_0^{\circ}\text{C}$ .

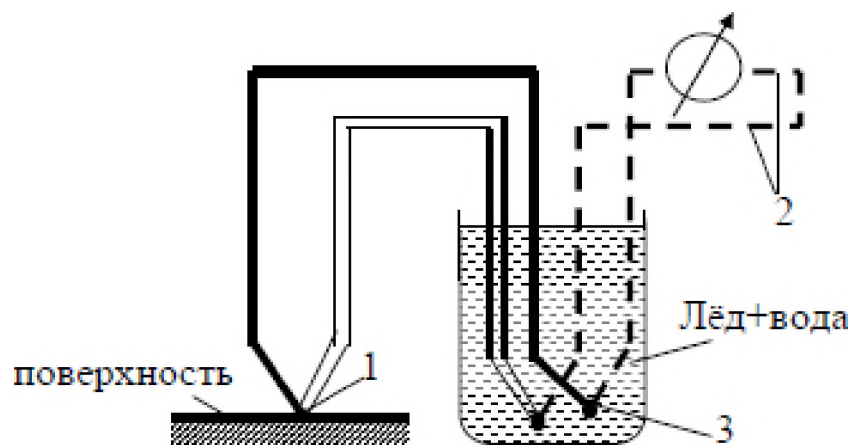


Рис.5. Схема подключения термопары к измерительному прибору  
1-горячий спай; 2- медные провода; 3-холодный спай

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

Таблица 1

Градуйровочная 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	1.12	1.16
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. 2.

Таблица 2

Характеристика стандартных термопар

Наименование термопары	Тип	Термо-э.д.с. t <sub>0</sub> =0°C, t=100°C	Верхний предел, °С	
			при длительном применении	при кратковременном применении
Платинородий (90%Pt+10%Rr)-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  $1\text{ кгс}/\text{м}^2$  ( $1\text{ кг}/\text{см}^2$ ) - техническая атмосфера.

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

формулу

$$p = \rho gh,$$

где  $p$  - давление, Н/м<sup>2</sup>;

$h$  - высота столба жидкости, м;

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

$g$  - ускорение силы тяжести в точке измерения, м/с<sup>2</sup>.

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/с<sup>2</sup>, называется физической атмосферой (атм).

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

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

$$P_{\text{в}} = P_6 - P.$$

Эта разность давлений измеряется вакуумметром и называется вакуумом (или разрежением), т.е.  $P = P_6 - P_{\text{в}}$ .

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 ма-

нометры.

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.6) со шкалой.

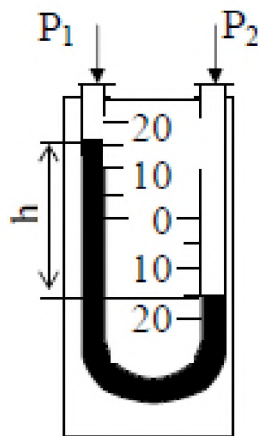


Рис.6. U-образный жидкостный манометр

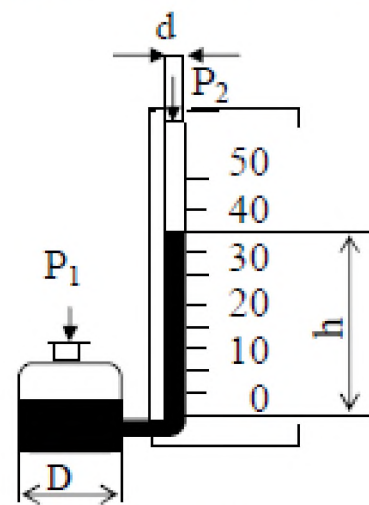


Рис.7. Чашечный жидкостный манометр

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, т.е.  $P_1 - P_2 = h$  мм ст. жидкости.

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

Разновидностью U-образного манометра является чашечный манометр, у которого одна трубка заменена чашкой (Рис.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:  $P_x = h$ .

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.8). Давление, определяемое наклонным микроманометром, вычисляется по формуле

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

где  $P$  - давление, мм столба жидкости;

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

$\alpha$  - угол наклона трубки к горизонтали.

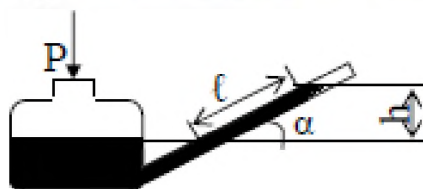


Рис.8. Схема микроманометра с наклонной трубкой

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 ( $\rho = 809,5$  кг/м<sup>3</sup>), то истинное значение величины измеряемого давления определяется по формуле

$$P_x = \zeta \cdot g \cdot K, \text{ Н/м}^2,$$

где  $\xi$  - 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.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 имеет овальное сечение и при повышении давления разгибается. Другой конец трубки связан передаточным механизмом 3 со стрелкой 4, которая поворачивается вокруг

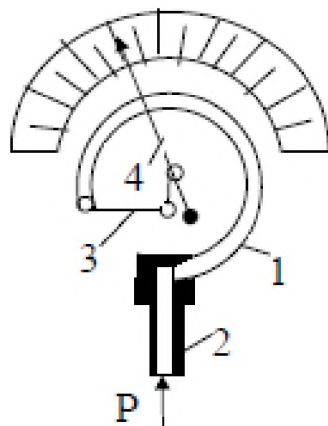


Рис.9. Манометр с трубчатой пружиной

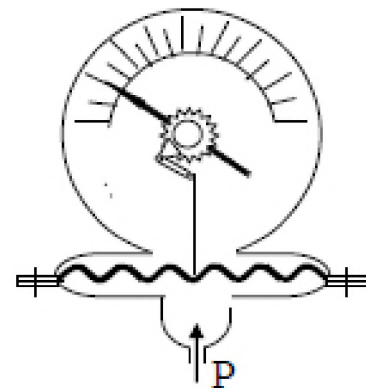


Рис.10. Схема мембранного манометра

своей осью 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.10). Мембранные приборы нашли широкое применение при измерении низких давлений и разрежений, в тягомерах и напоромерах.

### 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.

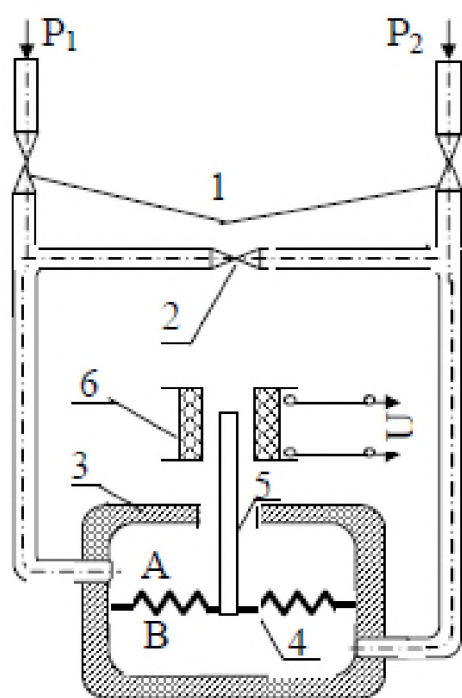


Рис.11. Дифференциальный мембранный манометр

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

Чувствительным элементом дифференциального мембранного манометра (Рис.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 уравновешивающем 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.

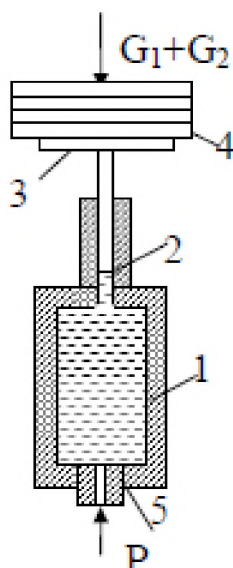


Рис 12. Схема грузопоршневого манометра

### 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. 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  $60 \text{ кг/см}^2$ .

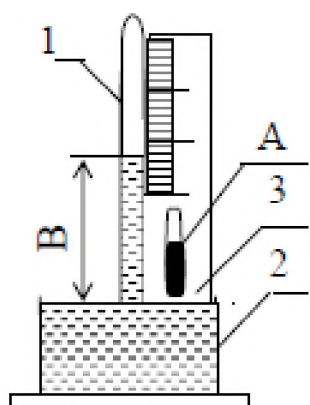


Рис.13. Схема ртутного чашечного барометра

### 2.4. Барометры

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

Ртутный чашечный барометр приведен на рис.13. Действие прибора основано на уравнивании давления атмосферы давле-

нием 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. 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

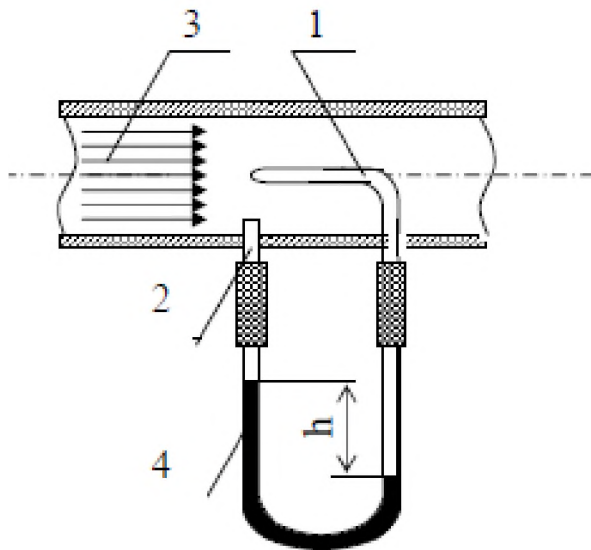


Рис.14. Схема замера динамического давления  
 1- трубка полного давления;  
 2- трубка для отбора статического напора;  
 3- замеряемый поток;  
 4- U-образный манометр

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

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

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

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

$P_d$  - динамическое давление, кг/м<sup>2</sup>.

Отсюда скорость потока

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

Т.к. разность давлений:

$$P_{\pi} - P_{ст} = h(\rho_{ж} - \rho_{г}),$$

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

$\rho_{ж} - \rho_{г}$  - соответственно плотности рабочей жидкости в дифманометре и вещества, находящегося над рабочей жидкостью, кг/м<sup>3</sup>, то

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

### 3.2. Дроссельные приборы

Дроссельные приборы основаны на замерах 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 [4,5]. Перепад давлений в дроссельных устройствах замеряется дифманометрами.

Дроссельные устройства называют приборами переменного перепада.

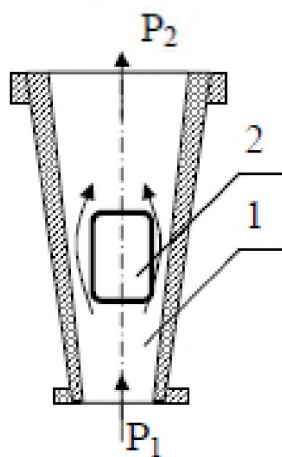


Рис.15. Ротаметр

Есть приборы постоянного перепада - ротаметры (Рис. 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 поплавок под воздействием протекающего потока поднимается до тех пор , пока кольцевой зазор между поплавком и внутренней поверхностью конусной трубы не увеличивается настолько, что подъёмная сила, действующая на поплавок, уравновесится 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/.

## ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 2

### Изучение изотермического процесса

Целью работы является изучение изотермических процессов сжатия и расширения воздуха.

#### Задание

1. Провести экспериментальное исследование изотермического процесса сжатия и расширения воздуха.
2. Составить отчет по выполненной работе.

#### Теоретическая часть

Процесс, в котором не изменяется температура газа, называется изотермическим процессом, а линия, изображающая этот процесс – изотермой. Из уравнения состояния  $pv = RT$  при  $T = \text{const}$  уравнение изотермы будет иметь вид  $pv = \text{const}$ , а график изотермы в  $p$ - $v$ -диаграмме – это равнобокая гиперболола (рис. 1).

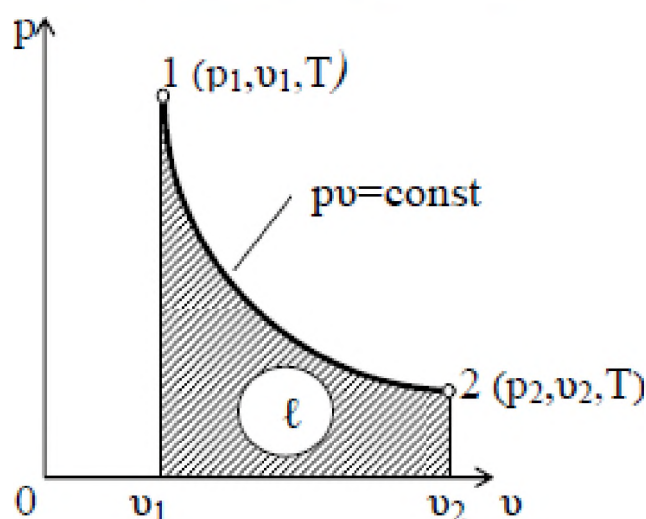


Рис. 1. Изотермический процесс в  $p - v$  диаграмме

Из уравнения процесса  $pv = \text{const}$  следует, что давление и удельный объем обратно пропорциональные величины, т.е.  $p_2/p_1 = v_1/v_2$ .

Так как  $T = \text{const}$ , то  $dT = 0$ . Тогда изменение внутренней энергии  $du = c_v \cdot dT = 0$  и изменение энтальпии  $di = c_p \cdot dT = 0$ , т.е. внутренняя энергия  $u$  и энтальпия  $i$  в процессе не изменяются ( $u = \text{const}$  и  $i = \text{const}$ ).

Работа 1 кг идеального газа в процессе  $T = \text{const}$  равна

$$\ell = \int_{v_1}^{v_2} p dv = \text{const} \int_{v_1}^{v_2} \frac{dv}{v} = RT \ln(v_2/v_1) = p_1 v_1 \ln(v_1/v_2) = RT \ln(p_1/p_2)$$

и в  $p$ - $v$  диаграмме изображается площадкой, ограниченной линией процесса 1-2, ординатами крайних точек 1 и 2 и осью абсцисс.

Так как  $du = 0$ , то первый закон термодинамики  $dq = du + d\ell$  для изотермического процесса имеет вид  $dq = d\ell$  или  $q = \ell = RT \ln(v_2/v_1)$ . Отсюда видно, что если газ расширяется, т.е.  $v_2 > v_1$ , то работа  $\ell$  и теплота  $q$  имеет знак (+) и всё подводимое к газу тепло расходуется на совершение работы, а при изотермическом сжатии

( $v_2 < v_1$ )  $q$  и  $\ell$  имеет знак (-) и вся затраченная работа  $\ell$  отводится от газа в виде теплоты  $q$ .

В  $T$ - $S$  диаграмме изотерма ( $T = \text{const}$ ) изображается горизонтальной прямой 1-2 (рис.2).

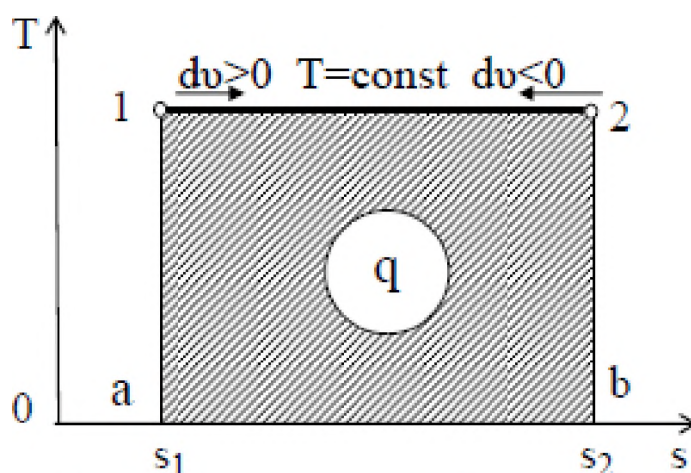


Рис. 2. Изотермический процесс в  $T - s$

Тепло, участвующее в процессе 1-2, изображается в  $T$ - $s$  диаграмме площадкой прямоугольника 12ba1, т.е.  $q = T \cdot (s_2 - s_1)$ , откуда изменение энтропии  $s_2 - s_1 = q/T = R \cdot \ln(v_2/v_1)$ .

Из этой формулы следует, что при расширении газа  $dv > 0$ , тепло к газу подводится и энтропия газа увеличивается, а при сжатии газа  $dv < 0$ , тепло от газа отводится и энтропия газа уменьшается.

Изотермический процесс является частным случаем политропного процесса, описываемого уравнением  $pV^n = \text{const}$ , где  $n$  – показатель политропы, который может изменяться от  $-\infty$  до  $+\infty$ . Для изотермического процесса  $n = 1$ , т.к.  $pV = \text{const}$ .

Итак, для изотермического процесса для  $M$  кг газа можно записать

$$P_1V_1 = P_2V_2 = P_3V_3 = PV = \text{const},$$

откуда  $P_2V_2/P_1V_1 = P_3V_3/P_1V_1 = P_3V_3/P_2V_2 = \text{const} = 1$ .

### Экспериментальная установка

Установка (рис.3) представляет собой две соединенные резиновым шлангом 1 вертикальные бюретки 2, наполовину заполненные водой.

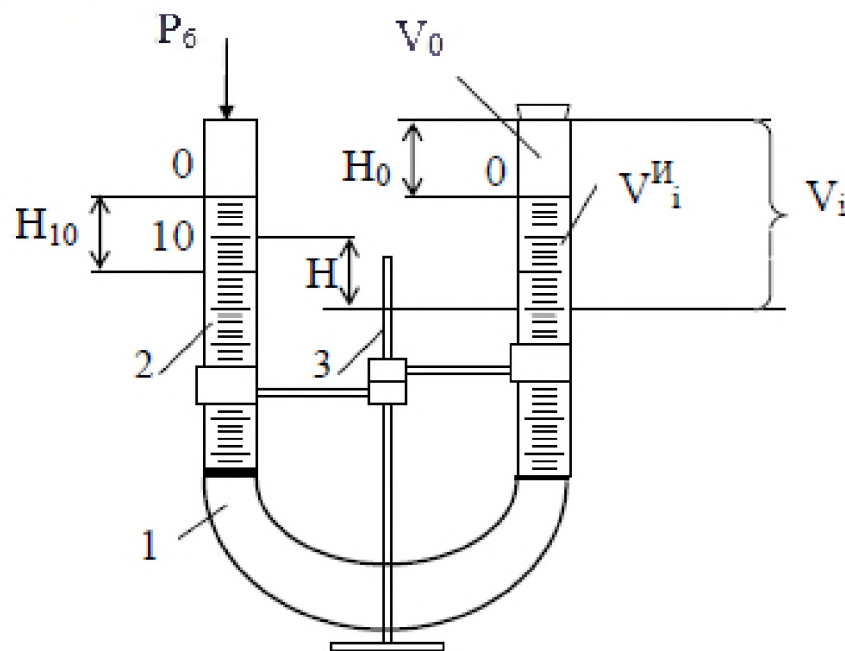


Рис. 3. Схема установки

Бюретки установлены в штативе 3. Одна бюретка герметично закрыта резиновой пробкой. Воздух, заключенный между пробкой и водой в этой бюретке, служит рабочим телом, с которым проводится процесс. Вторая бюретка открыта и служит для создания и измерения давления в закрытой бюретке.

Для измерения атмосферного давления используется барометр.

## Проведение опыта и обработка опытных данных

Проводится три опыта, для каждого из которых вычисляются объём воздуха  $V_i$  ( $\text{м}^3$ ) и его абсолютное давление в закрытой бюретке,  $P_i$  (Па).

Объём воздуха  $V_i$  (мл) определяется суммой объёмов: объёма заключённого между пробкой и нулевой отметкой шкалы  $V_0$  и объёма, замеренного по шкале,  $V_i^{\text{ш}}$ . 
$$V_i = V_0 + V_i^{\text{ш}}$$

Для определения объёма  $V_0$  линейкой измеряют высоту этого объёма  $H_0$  и высоту объёма 10 мл (по шкале бюретки)  $H_{10}$ . Искомый объём в мл находится по соотношению  $V_0 = 10 \cdot H_0 / H_{10}$ . (Величина  $V_0$  для всех 3-х опытов одна и та же.)

Первый замер (рис. 4,а) проводим при одинаковых уровнях воды в бюретках. В этом случае давление на уровни воды в бюретках одинаково и равно атмосферному давлению  $P_1 = P_6$  и  $H = 0$ . Объём воздуха  $V_1 = V_0 + V_1^{\text{ш}}$ .

Второй замер (рис. 4,б) проводим при давлении выше атмосферного. Сжатие воздуха осуществляем поднятием открытой бюретки до получения разницы уровней воды в бюретках 100–150 мм. При этом давление воздуха в закрытой бюретке уравнивается столбом жидкости  $H$  и барометрическим давлением  $P_6$ , т.е.  $P_2 = P_6 + H \cdot 9,81$  (Па). Объём воздуха  $V_2 = V_0 + V_2^{\text{ш}}$ .

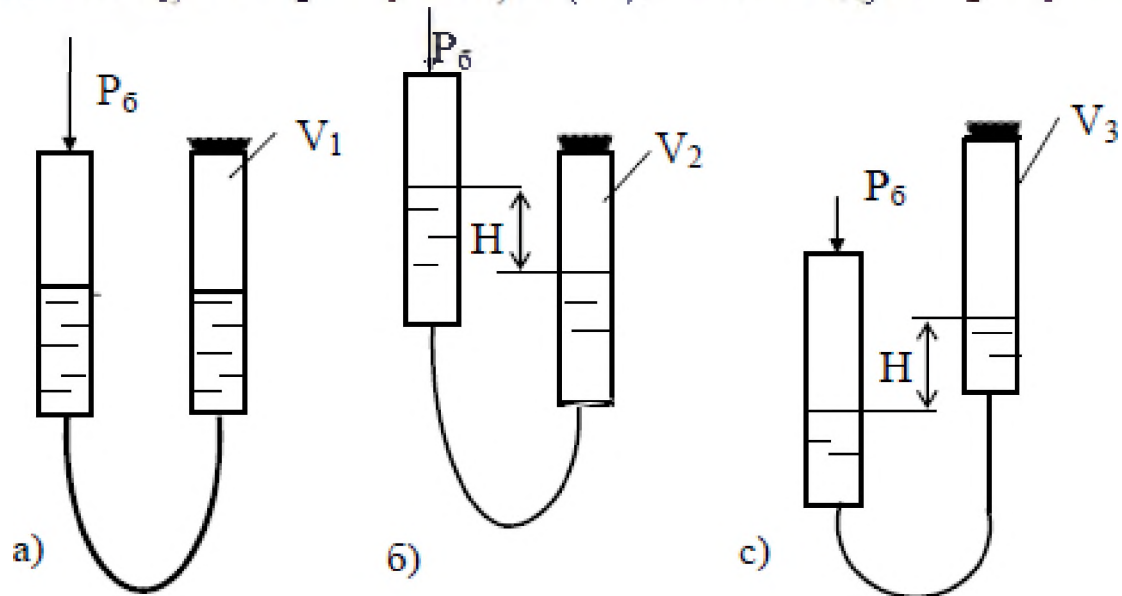


Рис. 4. Схема замера



Третий замер (рис. 4,с) проводим при давлении ниже атмосферного. Расширение воздуха осуществляем опусканием открытой бюретки до получения разницы уровней воды в бюретках 100÷150 мм. В этом случае в закрытой бюретке абсолютное давление будет ниже атмосферного и его величина определяется разницей атмосферного и столба жидкости Н.  $P_3 = P_6 \cdot H \cdot 9,81$  (Па).

Объём воздуха  $V_3 = V_0 + V_1^H$ .

Для каждого замера определяем произведение давления и объёма,  $P_i \cdot V_i$  (Па·м<sup>3</sup>), составляем и находим отношения

$P_2 V_2 / P_1 V_1$  и  $P_3 V_3 / P_1 V_1$  и сравниваем их с единицей.

Результаты измерений и расчётов заносим в протокол работы.

Таблица

### Протокол лабораторной работы

Пара метр	Измеряемый объём воздуха по шкале, $V_i^H$	Полный объём, $V_i = V_0 + V_i^H$		Разность уровней, Н	Абсолютное давление, $P_i$	Произведение, $P_i \cdot V_i$
		мл	м <sup>3</sup>			
№ замера	мл	мл	м <sup>3</sup>	мм.вод.ст.	Па	Па·м <sup>3</sup>
1						
2						
3						
Атмосферное давление $P_6 =$ Па. Объем, заключенный между пробкой и нулевой отметкой шкалы, $V_0 =$ мл						

Отчёт по выполненной работе должен содержать

1. Исходные данные работы.
2. Задание и схему установки.
3. Протокол лабораторной работы и обработку результатов опыта.
4. Изображение изотермического процесса в P-V и T-S координатах.

### Контрольные вопросы

1. Понятия идеального и реального газа.
2. Основные термодинамические процессы.
3. Изображение изотермического процесса в P-V и T-s координатах.
4. Определение теплоты и работы.

## ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 3

### 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 трехкоординатных осей. В соответствии с этим температурное поле называется одно-, двух- и трехмерным. Если температурное поле меняется во времени, то оно называется неустановившимся или нестационарным  $t = f(x, y, z, t)$ , если же не меняется – 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.

$$\lim_{\Delta n \rightarrow 0} \Delta t / \Delta n = \partial t / \partial n = \text{grad} \cdot t, \text{ K/m.}$$

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>,  $q=Q/F$ . 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

$$Q = -\lambda \cdot \frac{dt}{dn} F, \text{ Вт}, \quad (1)$$

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 (1) 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 (1)

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

где  $dt/dr$  – температурный градиент;  $r$  – радиус кольцевого слоя толщиной  $dr$ ;  $F = 2\pi r \ell$  – площадь боковой поверхности цилиндра радиусом  $r$  и длиной  $\ell$ , м<sup>2</sup>.

При интегрировании уравнения (2) получаем следующую расчетную формулу:

$$Q = \frac{\pi (t_{w1} - t_{w2}) \lambda}{\frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1}}, \text{ Вт}, \quad (3)$$

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. 1.

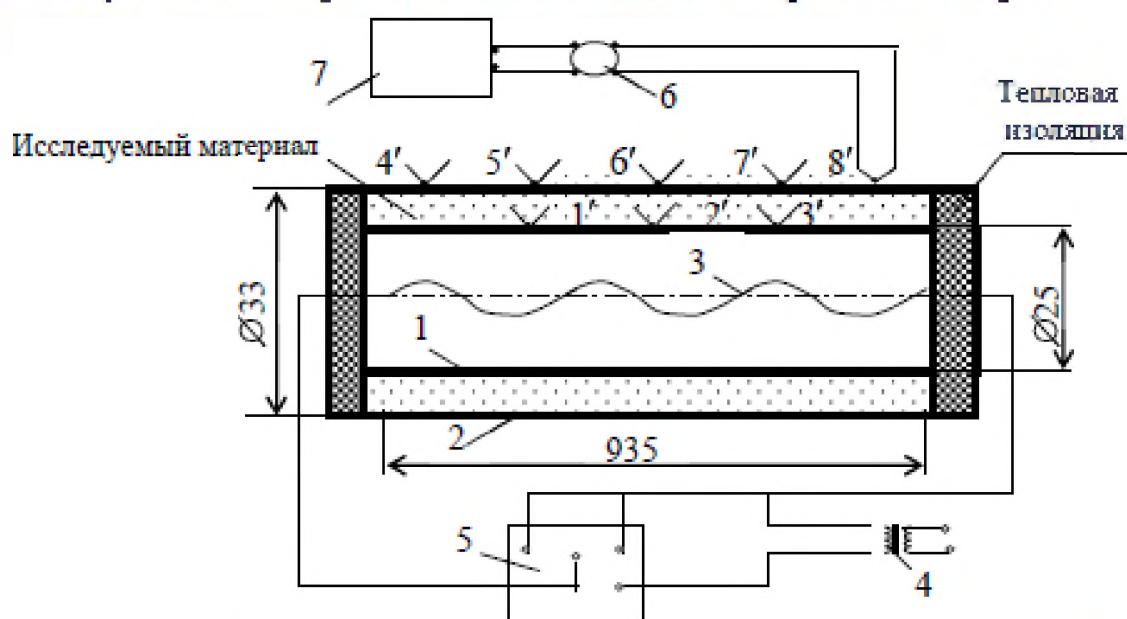


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки: 1-внутренняя латунная труба; 2-наружная латунная труба; 3-электрический нагреватель; 4-ЛАТР; 5-ваттметр; 6-переключатель терморпар; 7-потенциометр; 1'-8' - спаян хромель-копелевых терморпар

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 терморпарами, спаян которых заложены на внутренней и наружной поверхности исследуемого слоя.

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 1

#### Протокол испытаний

Мощность электронагревателя Q=	Вт; t <sub>0</sub> =				°C; E <sub>0</sub> =				mV
Номера термопар	1'	2'	3'	4'	5'	6'	7'	8'	
ЭДС термопар E <sub>i</sub> : 1 замер									
2 замер									
Среднее значение E <sub>иср.</sub> mV									
E=E <sub>0</sub> +E <sub>иср.</sub> mV									
Среднее значение температуры 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 ста-

ционарного 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 находим значение ЭДС  $E_o$ , соответствующее температуре окружающей среды  $t_o$ . Величину  $E_o$  складываем с ЭДС, измеренной потенциометром  $E_i$ , т.е. находим  $E=E_i+E_o$ . После этого по величине  $E$  по градуировочной таблице 2 находим измеряемую температуру  $t$ .

Коэффициент теплопроводности исследуемого материала находится из формулы (3)

$$\lambda=(Q \cdot \ell \ln d_2 / d_1) / [2 \pi \cdot \ell \cdot (t_{w1} - t_{w2})], \quad (4)$$

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.

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

Полученное значение  $\lambda$  следует отнести к средней температуре исследуемого материала  $t=0,5 \cdot (t_{w1}+t_{w2})$ .

#### Контрольные вопросы

1. Схема экспериментальной установки и порядок проведения опыта.
2. Механизм передачи тепла в процессе теплопроводности.
3. Определения температурного поля и температурного градиента.
4. Основной закон теплопроводности.
5. Коэффициент теплопроводности, физический смысл, размерность.
6. Термическое сопротивление теплопроводности плоской и цилиндрической стенок.
7. Распределение температуры по толщине плоской и цилиндрической однослойных стенок.

8. Расчетные формулы теплового потока через однослойные и многослойные поверхности.

Таблица 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

## ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 4

### Определение изобарной теплоёмкости воздуха

Целью работы является закрепление знаний по разделу курса "Теплоемкость газов" и освоение экспериментального определения теплоемкости газов методом протока.

#### Задание

1. Из опыта определить изобарную массовую теплоемкость воздуха при атмосферном давлении.
2. Составить отчет по выполненной работе.

#### Теоретическая часть

Теплоемкостью называется количество теплоты, которое нужно подвести или отвести от тела, чтобы изменить его температуру на 1 градус ( $1^{\circ}\text{C}$  или 1 К).

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

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

$$c = \mu c / \mu = c' / \rho; \quad c' = \rho \cdot c = c / 22,4 c'; \quad \bar{c} = \mu c = \mu \cdot c = c' \cdot 22,4$$

где  $\mu$  – молекулярная масса газа, кг/кмоль;

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

Теплоемкость газов зависит от температуры, если  $\Delta t = t_2 - t_1 \rightarrow 0$ , то мы имеем истинную теплоемкость. В общем случае теплоемкость 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  $\left[ c \right]_{t_1}^{t_2}$ . В интерва-



де температур от  $t_1$  до  $t_2$  средняя теплоемкость определяется по формуле

$$c \Big|_{t_1}^{t_2} = \frac{q}{t_2 - t_1} \quad |$$

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  $c_p - c_v = R$  (Уравнение Майера) или  $\mu c_p - \mu c_v = 8314$  Дж/(кмоль·К),

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

8314 – универсальная газовая постоянная, Дж/(кмоль·К);

Отношение  $c_p/c_v = k$ , где  $k$  – 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  $k = 1,3$

Для наиболее распространенных газов составлены справочные таблицы средних теплоемкостей для температур 0-2500<sup>0</sup>С с интервалом 100<sup>0</sup>С. Используя табличные значения средних теплоемкостей  $c \Big|_0^{t_1}$  и  $c \Big|_0^{t_2}$

и, можно найти среднюю теплоемкость в интервале температур от  $t_1$  до  $t_2$   $c \Big|_{t_1}^{t_2} = \frac{c \Big|_0^{t_2} \cdot t_2 - c \Big|_0^{t_1} \cdot t_1}{t_2 - t_1}$

Количество теплоты, затрачиваемой для нагрева  $G$  кг, или  $V$  м<sup>3</sup>, или  $M$  молей газа от  $t_1$   $t_2$ , находятся по формулам:

$$Q = G \cdot c \Big|_{t_1}^{t_2} (t_2 - t_1); \quad Q = V c' \Big|_{t_1}^{t_2} (t_2 - t_1); \quad Q = M \cdot \bar{c} \Big|_{t_1}^{t_2} (t_2 - t_1), \quad (\text{Дж})$$

Теплоемкость газовой смеси равна:

$$\text{массовая } c_{см} = \sum_{i=1}^n g_i \cdot c_i; \quad \text{Дж/(кг·К)}$$

$$\text{объемная } c'_{см} = \sum_{i=1}^n \gamma_i \cdot c'_i; \quad \text{Дж/(м}^3 \cdot \text{К)}$$

$$\text{мольная } \bar{c}_{см} = \sum_{i=1}^n \nu_i \cdot \bar{c}_i; \quad \text{Дж/(кмоль·К)}$$

где  $g_i$   $\gamma_i$  – массовые и объемные доли газовой смеси, соответственно.

## Описание установки и методики эксперимента

Схема экспериментальной установки показана на рис. 1.

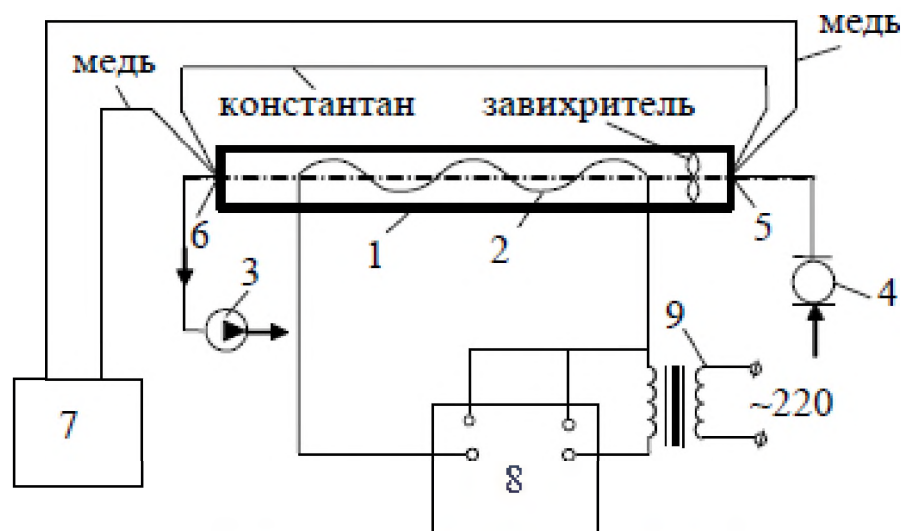


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

1- стеклянная труба; 2 – электрический нагреватель; 3 - вентилятор; 4 – газовый счетчик; 5 – холодный спай термопары; 6 – горячий спай термопары; 7 – милливольтметр; 8 – ваттметр; 9- ЛАТР

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 милливольтметра 7.

Для лучшего перемешивания воздуха в трубе 1 установлен завихритель. Труба 1 нагревается теплым воздухом, проходящим внутри нее, поэтому какая-то часть тепла будет теряться через трубу в окружающую среду.

## 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  $30 \div 50$  Вт.

Жидкостно-стеклянным термометром измерить температуру воздуха  $t_0$  на входе в газовый счетчик.

При помощи секундомера измерить время прохождения через установку  $\Delta V$  м<sup>3</sup> воздуха.

Измерить при помощи милливольтметра значение ЭДС дифференциальной термопары,  $E$  в мВ.

Все замеры производить через 7-10 мин после включения установки.

Результаты измерений занести в таблицу.

Таблица опытных данных

Номера замеров	Q, Вт	$\Delta V$ , м <sup>3</sup>	$\tau$ , с	$P_0$ , Па	$t_0$ , °C	E, мВ

### Обработка опытных данных

1. Определяем секундный массовый расход воздуха через установку  $G$  (кг/с) по формуле:

$$G = \rho \cdot \Delta V / \tau,$$

где  $\tau$  – время прохождения через установку  $\Delta V$  м<sup>3</sup> воздуха;

$\rho$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>.

2. Плотность воздуха вычисляем из уравнения Клапейрона по формуле:

$$\rho = p_0 / (R \cdot T),$$

где  $R=287$  Дж/(кг·К) – индивидуальная газовая постоянная воздуха;

$p_0$  – давление атмосферного воздуха, Па;

$T_0$  – абсолютная температура атмосферного воздуха, К,

$T_0 = 273 + t_0$ ;

3. Измеряем значение э.д.с. дифференциальной термопары  $E$ ,  $mV$  и определяем по формуле на сколько нагрелся воздух при прохождении через трубу,  $^{\circ}C$ :

$$\Delta t = 24,5 \cdot E,$$

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

4. Из уравнения:  $Q = G \cdot c_p \cdot \Delta t$

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

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

где 0,98 – коэффициент, учитывающий потери тепла поверхностью стеклянной пробки в окружающую среду;

$Q$  – мощность электронагревателя, Вт.

### Контрольные вопросы

1. Определение теплоемкости, размерность. Виды теплоемкости.
2. Какую теплоемкость воздуха определяли в работе? Зная эту теплоемкость, определить другие теплоемкости воздуха:  $c_v$ ,  $c_u$ ,  $c_p$ ,  $\mu c_p$ ,  $\mu c_v$ .
3. Формула Майера. Физический смысл газовой постоянной.
4. Используя уравнение Клапейрона, получить формулу для вычисления плотности воздуха.
5. Схема экспериментальной установки и порядок проведения работы.
6. Первый закон термодинамики, аналитическое выражение.
7. Определение цены деления по шкале ваттметра.
10. Измерение э.д.с. термопары потенциометром

Отчет по работе должен содержать:

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

## ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 5

### Определение коэффициента теплопередачи теплообменника 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.

#### ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

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

Процесс теплопередачи представляет собой процесс сложного теплообмена и состоит из следующих этапов, рис. 1:

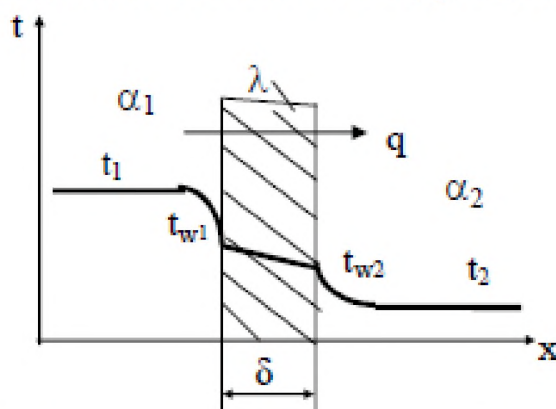


Рис. 1. Распределение температур по нормали к поверхности теплопередачи

- 1) теплоотдача между горячим теплоносителем и поверхностью стенки

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

- 2) теплопроводность через стенку

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

- 3) теплоотдача от поверхности стенки к холодному теплоносителю

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

где  $t_{w1}$ ,  $t_{w2}$  - температура поверхности 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 переноса 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

$$Q = K \Delta t_{\text{ср}} F, \quad (4)$$

$$\text{или } q = K \Delta t_{\text{ср}}, \quad (5)$$

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

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

$\Delta t_{\text{ср}}$  – средний температурный напор. Является движущей силой процесса теплопередачи. В простейшем случае он равен разности средних температур теплоносителей, т.е.

$$\Delta t_{\text{ср}} = t_1 - t_2,$$

где  $t_1, t_2$  – средняя температура горячего и холодного теплоносителей, °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

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (6)$$

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 материала стенки, Вт/(м·К).

Величина, обратная коэффициенту теплопередачи, называется термическим сопротивлением теплопередачи и обозначается  $R$ , м<sup>2</sup>·К/Вт.

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

Формула (7) показывает, что общее термическое сопротивление равно сумме частных сопротивлений:  $\frac{1}{\alpha_1}$ ,  $\frac{\delta}{\lambda}$  и  $\frac{1}{\alpha_2}$ .

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

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (8)$$

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

Для цилиндрической стенки уравнение теплопередачи будет иметь вид

$$Q = \pi K_{\ell} \Delta t_{cp} \ell, \quad (9)$$

где  $K_{\ell}$  - линейный коэффициент теплопередачи, Вт/(м.К);

$$K_{\ell} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 d_1} + \frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2 d_2}},$$

$\ell$  - длина цилиндрической стенки, м;

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

На практике уравнение (9) 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.

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 непрерывно 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.

**Смешительные** 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).

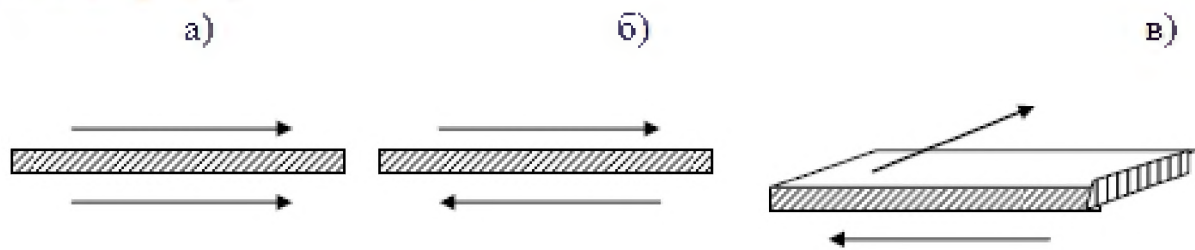


Рис.2. Схемы движения теплоносителей в теплообменниках:  
а – прямоточная; б – противоточная; в – перекрестная.

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:

$$Q = G_1 C_1 (t_1 - t_1') = G_2 C_2 (t_2'' - t_2') \quad (10)$$

или  $Q = V_1 \rho_1 C_2 (t_1' - t_1'') = V_2 \rho_2 C_2 (t_2'' - t_2')$  (11)

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

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

$C_1$  и  $C_2$  – 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

$$Q = G_1 \Gamma_1 = G_2 C_2 (t_2'' - t_2'), \quad (12)$$

где  $\Gamma$  – 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

$$Q = K\Delta t_{cp}F, \quad (13)$$

где  $K$  – коэффициент теплопередачи,  $Вт/(м^2 \cdot К)$ , определяется по формуле(6);  $\Delta t_{cp}$  – средний температурный напор,  $^{\circ}С$ ;

$F$  – поверхность теплопередачи,  $м^2$

Средний температурный напор,  $\Delta t_{cp}$ , зависит от схемы движения теплоносителей, рис.3.

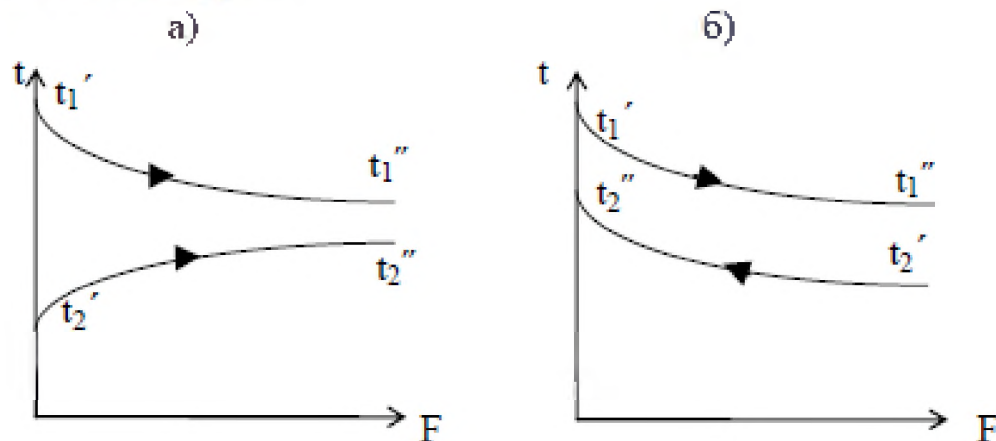


Рис.3. Изменение температур теплоносителей вдоль поверхности теплообмена при а) прямотоке и б) противотоке

Величина  $\Delta t_{cp}$  определяется через  $\Delta t_6$  – разность температур между теплоносителями на том конце аппарата, где она больше, и  $\Delta t_{\text{ж}}$  – меньшая разность температур между теплоносителями на противоположном конце аппарата.

$$\text{Если } \frac{\Delta t_6}{\Delta t_M} < 2, \text{ то } \Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_6 + \Delta t_M}{2}, \quad (14)$$

$$\text{если } \frac{\Delta t_6}{\Delta t_M} > 2, \text{ то } \Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_6 - \Delta t_M}{\ln \frac{\Delta t_6}{\Delta t_M}}. \quad (15)$$

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

## ЗАДАНИЕ

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

### ОПИСАНИЕ ОПЫТНОЙ УСТАНОВКИ

Схема опытной установки представлена на рис. 4.

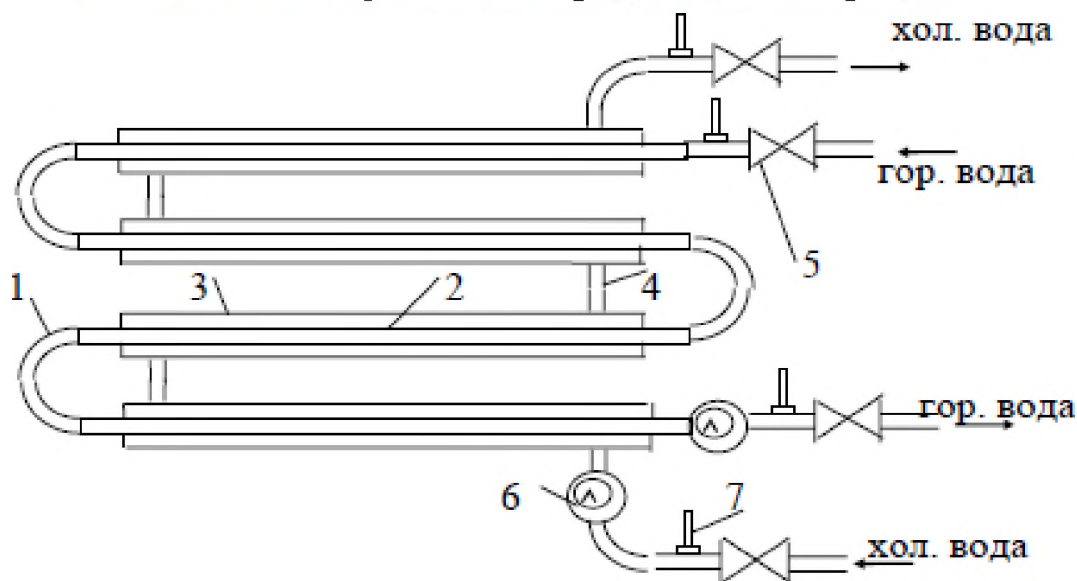


Рис. 4. Схема опытной установки

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 таблицу 1.

### ОБРАБОТКА ОПЫТНЫХ ДАННЫХ

Таблица 1

#### Протокол испытаний

Параметр	Горячий т/н	Холодный т/н	Аппарат
<b>Опытные параметры</b>			
Начальная температура, °С	$t_1' =$	$t_2' =$	
Конечная температура, °С	$t_1'' =$	$t_2'' =$	
Средняя температура, °С	$t_1 =$	$t_2 =$	$t_w =$
Объем, м <sup>3</sup>	$V_r =$	$V_x =$	
Время, с	$\tau_1 =$	$\tau_2 =$	
<b>Расчетные параметры</b>			
Скорость, м/с	$w_1 =$	$w_2 =$	
Критерий Рейнольдса	$Re_1 =$	$Re_2 =$	
Критерий Нуссельта	$Nu_1 =$	$Nu_2 =$	
Коэффициент теплоотдачи, Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	$\alpha_1 =$	$\alpha_2 =$	
Тепловой поток, Вт			$Q =$
Опытный коэф. теплопередачи			$K_o =$
Теоретический коэф. теплопередачи.			$K_r =$

#### Опытное определение коэффициента теплопередачи

- 1) Средние температуры горячего и холодного теплоносителей

$$t_1 = 0,5(t_1' + t_1'') \quad t_2 = 0,5(t_2' + t_2'').$$

- 2) Средняя температура поверхностей теплопередачи внутренней трубы  $t_w = 0,5(t_1 + t_2)$

- 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

Теплоноси- тель	$t, ^\circ\text{C}$	$C$ Дж/(кгК)	$\rho$ кг/м <sup>3</sup>	$\nu$ , м <sup>2</sup> /с	$\lambda$ Вт/(мК)	$\beta$ , 1/К	Pr
Горячая вода	$t_1$						
Холодная во- да	$t_2$						
	$t_w$	-	-	-	-	-	Pr <sub>w</sub>

4) Поверхность теплопередачи  $F=4\pi d_{\text{ср}}L$ , м<sup>2</sup>,

где  $L=0,935$  м – длина одного элемента;  $d_{\text{ср}}=0,5(d_{\text{в}}+d_{\text{н}})$  м – средний диаметр внутренней трубы;  $d_{\text{в}}=0,028$  м,  $d_{\text{н}}=0,032$  м – внутренний и наружный диаметры внутренней трубы.

5) Средняя разность температур,  $\Delta t_{\text{ср}}$ , рис.5.

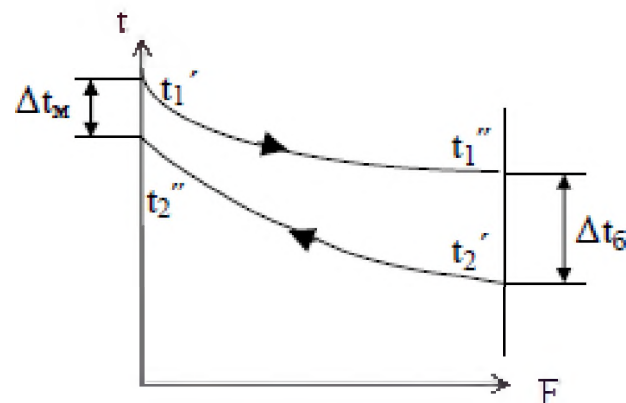


Рис.5. Схема распределения температур вдоль поверхности теплообмена при противотоке

$\Delta t_{\text{ср}} = 0,5(\Delta t_{\text{б}} + \Delta t_{\text{ж}})$  при  $\Delta t_{\text{б}}/\Delta t_{\text{ж}} < 2$ ,

или  $\Delta t_{\text{ср}} = (\Delta t_{\text{б}} - \Delta t_{\text{ж}}) / \ln(\Delta t_{\text{б}}/\Delta t_{\text{ж}})$  при  $\Delta t_{\text{б}}/\Delta t_{\text{ж}} > 2$ ,

где  $\Delta t_{\text{б}}$  – большая разность температур между теплоносителями на одном конце аппарата;

$\Delta t_x$  – меньшая разность температур между теплоносителями на другом конце аппарата.

б) Тепловая нагрузка аппарата,  $Q$ .

Так как при работе аппарата он не успевает выйти на стационарный режим, то теплота горячей и холодной воды не одинакова (тепловой баланс не сходится).

$$Q = (V_1 \rho_1 c_1 (t'_1 - t''_1) + V_2 \rho_2 c_2 (t'_2 - t''_2)) / 2 \text{ Вт},$$

где  $V_1, V_2$  – объемные расходы,  $\text{м}^3/\text{с}$ ,  $V_1 = V_r / \tau_1$ ,  $V_2 = V_x / \tau_2$ ;

$\rho_1, \rho_2$  – плотности,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$c_1, c_2$  – теплоемкости,  $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ .

7) Опытный коэффициент теплопередачи

$$K_o = Q / F \Delta t_{cp}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

**Теоретическое определение коэффициента теплопередачи**

1) Скорости движения горячей и холодной воды

$$w_1 = \frac{4 \cdot V_1}{\pi d_B^2}, \quad w_2 = \frac{4 \cdot V_2}{\pi (D^2 - d_H^2)},$$

где  $w_1, w_2$  – скорости горячей и холодной воды,  $\text{м}/\text{с}$ ;

$D$  – внутренний диаметр наружной трубы,  $\text{м}$ ,  $D = 0,068 \text{ м}$ .

2) Критерии Рейнольдса для теплоносителей

$$Re_1 = \frac{w_1 d_3}{\nu_1}, \quad Re_2 = \frac{w_2 d_3}{\nu_2},$$

где  $d_3$  – эквивалентный диаметр потока для холодной воды,  $\text{м}$ ,  $d_3 = D - d_B$ ;

$\nu_1, \nu_2$  – кинематическая вязкость горячей и холодной воды,  $\text{м}^2/\text{с}$ .

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

$$Nu = 0,021 Re^{0,8} Pr^{0,43} (Pr/Pr_w)^{0,25} \epsilon_l \epsilon_R \text{ при } Re > 10000;$$

$$Nu = K_o Pr^{0,43} \epsilon_l \epsilon_R \text{ при } Re = 2300 - 10000;$$

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

где  $\epsilon_R$  – поправочный коэффициент на кривизну трубы: для холодной воды  $\epsilon_R = 1$ , для горячей воды  $\epsilon_R = 1 + 1,77 d_g / R$  ( $R$  – радиус кривизны колена внутренней трубы);

$\epsilon_l$  – поправочный коэффициент на длину трубы: для холодной воды  $\epsilon_l = 1$ , для горячей воды  $\epsilon_l$  выбирается по табл.3.

Таблица 3

Значение коэффициента  $\varepsilon_\xi$ 

$L/d$	$\varepsilon_\xi$		
	$Re \leq 2300$	$Re=10000$	$Re=10^3$
10	1,28	1,18	1,10
15	1,18	1,13	1,08
20	1,13	1,10	1,06

$K_o$  – коэффициент, зависит от величины критерия Рейнольдса и находится по табл.4.

Таблица 4

Значение множителя  $K_o$ 

$Re$	2100	2200	2300	2400	2500	3000	4000	5000	6000	8000	10000
$K_o$	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  $\alpha_1 = Nu_1 \lambda_1 / d_в$ ,  $\alpha_2 = Nu_2 \lambda_2 / d_в$ , Вт/(м<sup>2</sup>·К).

5) Теоретический коэффициент теплопередачи

$$K_T = 1 / (1/\alpha_1 + \delta/\lambda + 1/\alpha_2 + R_s),$$

где  $\lambda = 46$  Вт/(м·К) – коэффициент теплопроводности стали;

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

$R_s = 0,0015$  м<sup>2</sup>·К/Вт – термическое сопротивление загрязнений.

Полученное значение коэффициента теплопередачи  $K_T$  сравнить с опытным значением,  $K_o$ .

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Классификация теплообменных аппаратов.
2. Уравнение теплового баланса. Уравнение теплопередачи.
3. Коэффициент теплопередачи. Физический смысл, формула.
4. Схемы движения теплоносителей в теплообменных аппаратах и схемы распределения температур теплоносителей вдоль поверхности теплообмена.
7. Средняя разность температур,  $\Delta t_{ср}$ .
8. Критериальные уравнения конвективного теплообмена, их выбор.

## ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 6

### Исследование свойств влажного воздуха

Целью работы является углубление знаний по разделу "Влажный воздух", а также получение навыков пользования H-d диаграммой влажного воздуха в проведении экспериментальных исследований.

#### Задание

1. Определить состояние воздуха в помещении лаборатории.
2. Исследовать при помощи H-d диаграммы:
  - а) процессы подогрева и охлаждения данного воздуха до определенной температуры;
  - б) процессы испарения воды в исходный (холодный) и подогретый воздух.

#### Теоретическая часть

Атмосферный воздух представляет собой смесь сухого воздуха и водяных паров. Такой воздух называется влажным. Влажный воздух (далее – воздух) является самым распространенным рабочим телом: воздух может быть теплоносителем, сушильным агентом, рабочим телом в производстве сжатого воздуха и т. д.

К влажному воздуху применимы уравнения для смесей идеальных газов. Тогда по закону Дальтона для смесей газов давление влажного воздуха ( $P$ ) равно сумме парциальных давлений сухого воздуха ( $P_{с.в}$ ) и водяного пара ( $P_{п}$ ), т.е.

$$P = P_{с.в} + P_{п} \quad (1)$$

В состав влажного воздуха может входить любой пар: влажный пар, сухой насыщенный пар и перегретый пар.

В зависимости от вида пара, входящего в состав воздуха, различают:

**ненасыщенный воздух** – если пар, входящий в состав воздуха, является перегретым;

**воздух насыщенный** – если в воздух входит сухой насыщенный пар;

**гуман** – если пар, входящий в состав воздуха, является влажным.

Практическое применение имеет ненасыщенный воздух.

Основными параметрами влажного воздуха являются:

1. **Абсолютная влажность**  $\rho_{п}$ , кг/м<sup>3</sup> – масса водяного пара ( $m_{п}$ ), содержащаяся в 1 м<sup>3</sup> влажного воздуха, т.е.

$$\rho_{\text{п}} = m_{\text{п}} / V_{\text{в.в.}} \quad (2)$$

2. **Относительная влажность  $\varphi$**  – отношение абсолютной влажности ( $\rho_{\text{п}}$ ) к максимально возможной абсолютной влажности ( $\rho_{\text{п}}^*$ ) при той же температуре  $t$ , т.е.

$$\varphi = \rho_{\text{п}} / \rho_{\text{п}}^* \quad (3)$$

Так как водяной пар в составе влажного воздуха является идеальным газом, то по уравнению Бойля-Мариотта при постоянной температуре

$$v_{\text{п}} / v_{\text{п}}^* = P_{\text{п}} / P_{\text{п}}^* \quad \text{или} \quad \rho_{\text{п}} / \rho_{\text{п}}^* = P_{\text{п}} / P_{\text{п}}^* .$$

следовательно,  $\varphi = P_{\text{п}} / P_{\text{п}}^* . \quad (4)$

т.е. относительная влажность воздуха численно равна отношению парциального давления водяного пара в нем ( $P_{\text{п}}$ ) к максимально возможному давлению водяного пара при той же температуре воздуха ( $P_{\text{п}}^*$ ).

Относительная влажность может быть выражена либо в долях единицы, либо в %. Если  $\varphi=1$  или  $\varphi=100\%$ , то воздух насыщенный; если  $\varphi=0$ , то воздух сухой; если воздух ненасыщенный, то  $\varphi$  изменяется от 0 до 1 или от 0 до 100 %.

3. **Влагосодержание  $d$**  – это количество влаги, содержащейся во влажном воздухе, приходящееся на 1 кг сухого воздуха. Влагосодержание измеряется в кг/кг с.в. или в г/кг с.в.

По определению  $d = m_{\text{п}} / m_{\text{с.в.}} \quad (5)$

Используя уравнение Клапейрона для смеси идеальных газов, при  $[d]=\text{г/кг с.в}$  имеем

$$d = 622 \cdot P_{\text{п}} / (B - P_{\text{п}}) \quad (6)$$

или (при  $[d]=\text{кг/кг с.в}$ )  $d = 0,622 \cdot P_{\text{п}} / (B - P_{\text{п}}) \quad (7)$

4. **Степень насыщения  $\psi$**  – отношение влагосодержания воздуха  $d$  к максимально возможному влагосодержанию  $d_{\text{max}}$  при той же температуре и давлении влажного воздуха, т.е.

$$\psi = d / d_{\text{max}} . \quad (8)$$



5. **Энтальпия влажного воздуха**  $H$  – определяется как энтальпия газовой смеси, состоящей из 1 кг сухого воздуха ( $h_{с.в.}$ ) и энтальпии  $d$  кг водяного пара ( $h_{п.}$ ), т.е.

$$H = h_{с.в.} + h_{п.} \cdot d \quad (9)$$

В соответствии с установившейся практикой энтальпии сухого воздуха и воды отсчитываются от  $0^{\circ}\text{C}$ . Тогда

$$h_{с.в.} = C_p \cdot t \quad (10)$$

$$\text{и } h_{п.} = r + C_p^{\text{п.}} \cdot t, \quad (11)$$

где  $C_p$  и  $C_p^{\text{п.}}$  – удельные изобарные теплоемкости, соответственно, сухого воздуха и водяного пара;  $r$  – теплота парообразования при  $0^{\circ}\text{C}$ .

Принимая для приближенных расчетов  $C_p^{\text{п.}} = 1,93$  кДж/(кг·К);  $r = 2501$  кДж/кг и  $C_p = 1$  кДж/(кг·К), получим для энтальпии влажного воздуха в кДж/кг с.в

$$H = t + (2501 + 1,93 \cdot t) \cdot d, \quad (12)$$

Для влажного воздуха характерны три температуры: температура воздуха по сухому термометру (или просто температура воздуха), температура мокрого термометра и температура точки росы.

**Сухой термометр** – обычный термометр, которым измеряют температуру воздуха. Температура воздуха по сухому термометру обозначается  $t$ .

**Мокрый термометр** – термометр, у которого ртутный шарик обернут тканью, смоченной водой. Температура по мокрому термометру обозначается  $t_{\text{м.}}$ .

**Температура точки росы** – предельная температура охлаждения воздуха, при которой начинается конденсация водяных паров из воздуха. Температура точки росы обозначается  $t_p$ .

Для ненасыщенного воздуха соблюдается неравенство  $t > t_{\text{м.}} > t_p$ . Для насыщенного воздуха все три температуры одинаковы,  $t = t_{\text{м.}} = t_p$ .

Изменение параметров воздуха в различных процессах наглядно отражается в  $H$ - $d$  диаграмме влажного воздуха, опубликованной русским ученым Л.К.Рамзиным в 1918 г.

Диаграмма построена в косоугольной системе координат **энтальпия – влагосодержание** с углом между осями в  $135^{\circ}$ . Диаграмма построена для среднего атмосферного давления в 745 мм.рт.ст..

Каждая точка диаграммы соответствует определенному состоянию влажного воздуха. Для определения состояния воздуха в Н-d диаграмме должны быть заданы любые два параметра:  $t$  и  $\phi$ ,  $t$  и  $t_{\text{ж}}$ ,  $t$  и  $d$  и т.д., главное – линии заданных параметров должны дать в диаграмме пересечение.

### Выполнение работы

**1 этап.** С помощью психрометра определяем температуры сухого ( $t$ ) и мокрого ( $t_{\text{ж}}$ ) термометров воздуха в помещении.

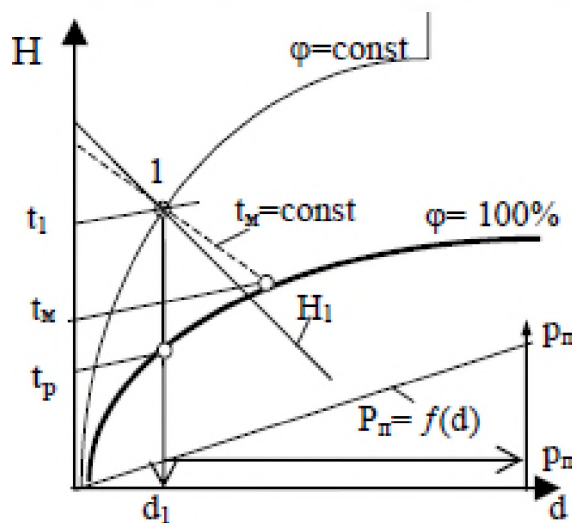


Рис1. Определение параметров воздуха по Н-d диаграмме

Используя полученные значения температур по Н-d диаграмме влажного воздуха находим положение точки 1, соответствующей данному состоянию воздуха, рис.1. Через полученную точку проводим линию относительной влажности,  $\phi_1=\text{Const}$ , линии влагосодержания,  $d_1=\text{Const}$  и энтальпии,  $H_1=\text{Const}$ . Температура точки росы находится на пересечении

линии  $d_1=\text{const}$  и пограничной кривой  $\phi=100\%$ .

Для определения парциального давления водяных паров в воздухе  $p_{\text{п}}$  надо из точки 1 опустить вертикаль до линии  $p_{\text{п}}=f(d)$  и от неё уйти вправо на ось давлений на которой и взять числовое значение  $p_{\text{п}}$ . Парциальное давление сухого воздуха,  $P_{\text{с.в}}$ , определяем по формуле  $P_{\text{с.в}}=B-p_{\text{п}}$ , где  $B$  – давление атмосферного воздуха.

**2 этап.** По Н-d диаграмме проследим возможные процессы охлаждения заданного воздуха (рис.2):

а) до температуры  $t_2$ , выше температуры точки росы  $t_p$ , процесс 1-2;

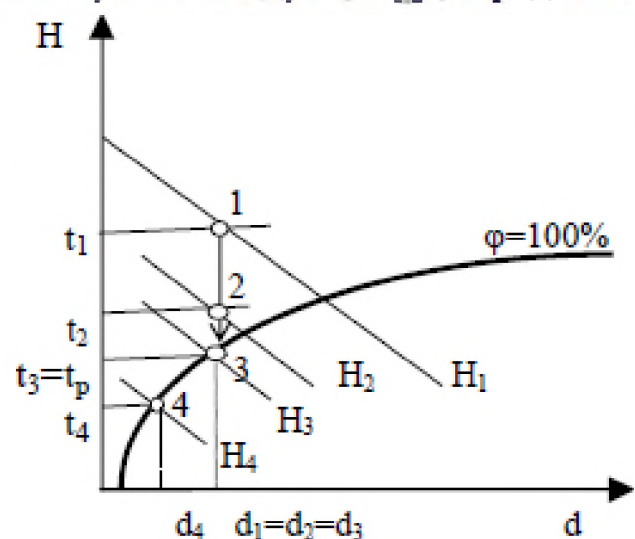


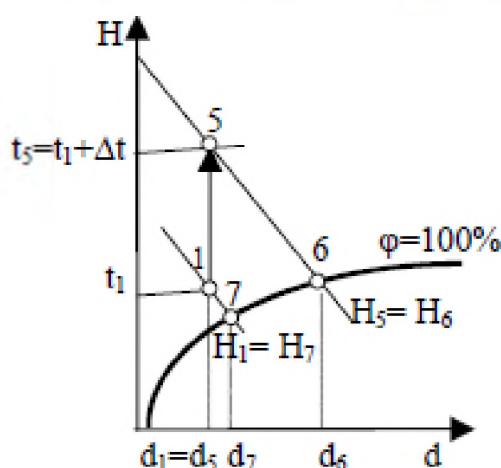
Рис.2 Охлаждение воздуха

- б) до температуры  $t_3$ , равной температуре точки росы, процесс 1-3;  
 в) до температуры  $t_4$ , ниже температуры точки росы, процесс 1-3-4.

Все процессы охлаждения воздуха изображаем в  $H-d$  диаграмме и для каждого из них вычисляем отнимаемое от воздуха тепло, которое определяется разностью энтальпий исходной и конечной точек, т.е.

$$q_{1-2}=H_1-H_2 \quad ; \quad q_{1-3}=H_1-H_3 \quad ; \quad q_{1-3-4}=H_1-H_4 \quad , \text{ кДж/кг с.в.}$$

Для процесса 1-3-4 определяем количество образовавшегося



конденсата,  $m=d_1 - d_4 =$  , г/кг с.в.

3 этап. Нагреваем исходный воздух (рис.3) на  $\Delta t$  °С (задается), процесс 1-5, и определяем максимальные количества воды, которые можно испарить в исходный воздух (процесс 1-7) и в подогретый воздух (процесс 5-6) по формулам:  $m_{1-7}=d_7-d_1$  и  $m_{5-6}=d_6-d_1$  г/кг с.в.

Рис.3. Процессы нагревания воздуха и испарения

Параметры, снятые с  $H-d$  диаграммы необходимо уточнить по справочнику. После этого

результаты работы поместить в протокол испытаний.

#### Протокол испытаний

Точка	Исходное состояние	Параметры состояний					
		$\phi$ , %	$d$ , г/кг с.в.	$H$ , кДж/кг с.в.	$t_p$ , °С	$P_{п.}$ , кПа	$P_{с.в.}$ , кПа
1	$t_1=$ ; $t_{эл}=$						
2	$t_2=$ ; $d_2=d_1$						
3	$\phi=100\%$ ; $d_3=d_1$	100					
4	$\phi=100\%$ ; $t_4=$	100					
5	$t_5=$ ; $d_5=d_1$				-	-	-
6	$\phi=100\%$ ; $H_6=H_5$	100			-	-	-
7	$\phi=100\%$ ; $H_7=H_1$	100			-	-	-

#### Контрольные вопросы.

1. Дайте определение влажного воздуха.
2. Перечислите основные параметры влажного воздуха.

3. Поясните устройство и правила пользования H-d диаграмма влажного воздуха.

4. Найдите по H-d диаграмме основные параметры воздуха, температуру точки росы и температуру мокрого термометра (по данным преподавателя).

5. Перечислите основные процессы во влажном воздухе. Проведите их расчет (нагрев воздуха, охлаждение, испарение воды в воздух, смешение потоков воздуха, осушка) по данным предложенным преподавателем.

## Список использованных источников

- 1 Теплотехнические измерения и приборы / Г.И. Иванова, Н.Д. Кузнецов, В.С. Чистяков. – М.: МЭИ, 2005. – 450 с.
- 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. – 328 с.
- 3 Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент: Справочник / Под общ. ред В.М. Зорина: М.: Энергоатомиздат, 1988. – 560 с.
- 4 Нащокин В.В. Техническая термодинамика и теплопередача. – М.: Высш. шк., 1980. – 469 с.
- 5 Рабинович О.М. Сборник задач по технической термодинамике. – М.: Машиностроение, 1973. – 344 с.
- 6 Аметистов, Е. В. Основы современной энергетики: учебник / Е. В. Аметистов. – М.: Изд-во МЭИ, 2010. – 453 с.
- 7 Барочкин, Е. В. Общая энергетика: курс лекций / Е.В. Барочкин, С. А. Панков, Г. В. Ледуховский; под ред. Е. В. Барочкина. – Иваново: Изд-во Ивановск. гос. энерг. ун-та, 2013. – 295 с.
- 8 Старовойтов, В. Н. Общая энергетика: учебное пособие / В. Н. Старовойтов, В. Н. Лифанов – Владивосток: Изд. дом Дальневост. федерал. ун-та, 2012. – Ч. 1. – 97 с.
- 9 Быстрицкий Г. Ф. Основы энергетики: учебник / Г.Ф. Быстрицкий. – М.: КноРус, 2013. – 350 с.
- 10 Быстрицкий Г.Ф. Общая энергетика: учебное пособие. — Москва: КноРус, 2010.
- 11 Промышленные теплоэнергетические установки и системы: учеб. пособие для вузов / Б.В. Сазанов, В.И. Ситас. - М.: Изд. дом МЭИ, 2014.
- 12 Шаров Ю.В. Электроэнергетика: учебное пособие / Ю.В. Шаров и др. – М.: Форум, 2013. – 383 с.