

Документ подписан простой электронной подписью

Информация о владельце:

ФИО: Емельянов Сергей Геннадьевич

Должность: ректор

Дата подписания: 19.09.2024 09:46:24

Уникальный программный ключ:

9ba7d3e34c012eba476ffd2d064cf2781953be730df2374d16f3c0ce536f0fc6

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

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

Кафедра инфраструктурных энергетических систем

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе

О.Г. Локтионова

« 23 » 08 2024 г.

ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА

Методические указания к лабораторным работам для студентов
направления подготовки 08.05.01 «Строительство уникальных
зданий и сооружений» очной и заочной форм обучения

Курск 2024 г.

УДК 536.7, 536.2.08, 536.24

Составитель: В.А. Жмакин.

Рецензент

Кандидат технических наук, доцент кафедры
инфраструктурных энергетических систем Н.Е. Семичева

Техническая теплотехника: методические указания к лабораторным работам для студентов направления подготовки 08.05.01 «Строительство уникальных зданий и сооружений» очной и заочной форм обучения / Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: В.А. Жмакин. – Курск, 2024. – 85 с.: ил. 41, табл. 15, – Библиогр.: с. 82.

Приводятся методики выполнения лабораторных работ и вопросы для самоконтроля и к защите лабораторных работ по дисциплине «Техническая теплотехника», а также необходимый справочный материал в виде таблиц.

Методические указания предназначены для студентов направления подготовки 08.05.01 «Строительство уникальных зданий и сооружений» очной и заочной форм обучения.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать 29.08.24 Формат 60x84 1/16.
Усл. печ.л. 4,94. Уч. изд.л. 4,47. Тираж 50 экз. Заказ 484. Бесплатно.
Юго-Западный государственный университет.
305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

Содержание

Общие указания.....	4
Охрана труда и техника безопасности при выполнении лабораторных работ.....	5
Лабораторная работа 1 «Теплотехнические приборы и измерения»	6
Лабораторная работа 2 «Определение изобарной теплоёмкости воздуха».....	25
Лабораторная работа 3 «Исследование газового изотермического процесса».....	30
Лабораторная работа 4 «Исследование свойств влажного воздуха».....	36
Лабораторная работа 5 «Испытание одноступенчатого поршневого компрессора».....	42
Лабораторная работа 6 «Испытания паровой компрессионной холодильной установки».....	53
Лабораторная работа 7 «Определение коэффициента теплопроводности изоляционных материалов».....	62
Лабораторная работа 8 «Определение коэффициента теплоотдачи горизонтальной трубы при свободной конвекции воздуха».....	68
Лабораторная работа 9 «Определение коэффициента излучения и степени черноты твердого тела».....	75
Библиографический список	82
Приложения.....	83

ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ

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

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

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

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

ОХРАНА ТРУДА И ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Организация безопасной работы при выполнении лабораторных работ на кафедре инфраструктурных энергетических систем производится в соответствии с требованиями ГОСТ 12.0.003-2015 «Система стандартов по безопасности труда. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация», ГОСТ 12.1.004-91 «Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность. Общие требования», ГОСТ 12.1.005-88 «Система стандартов безопасности труда. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны», ГОСТ 12.1.010-76. «Система стандартов безопасности труда. Взрывобезопасность. Общие требования», ГОСТ 12.1.019-2017 «Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты».

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

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

Лабораторная работа № 1.

«ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ И ИЗМЕРЕНИЯ»

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

Задание

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

Краткие сведения о теплотехнических измерениях и приборах

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

Наиболее распространенные приборы:

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

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

Образцовые — для проверки и градуирования приборов.

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

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

1. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ

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

Температура измеряется термометрами и пирометрами.

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

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

1.1. Термометры

1.1.1. Термометры расширения

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

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

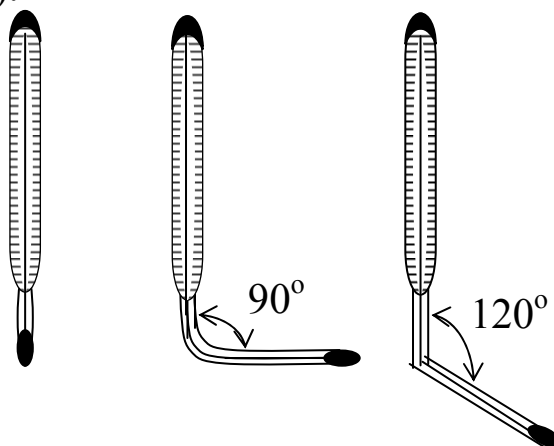


Рис.1.1. Термометры жидкостно-стеклянные

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

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

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

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

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

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

Дилатометрические термометры

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

Зависимость длины твердого тела от его температуры определяется выражением

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

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

α — средний температурный коэффициент линейного расширения тела, град^{-1} .

Различают стержневые и пластинчатые (биметаллические) дилатометрические термометры.

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

связанную с ним рычагом стрелку или электрические контакты.

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

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

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

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

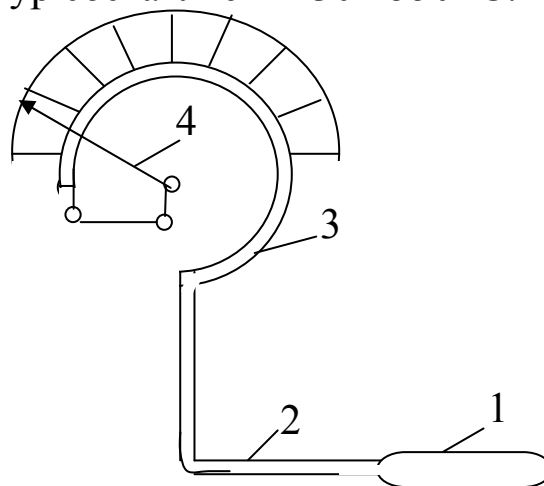


Рис.1.2. Схема манометрического термометра

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

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

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

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

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

1.1.2. Термометры сопротивления

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

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

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

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

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

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

A и B — постоянные термометра.

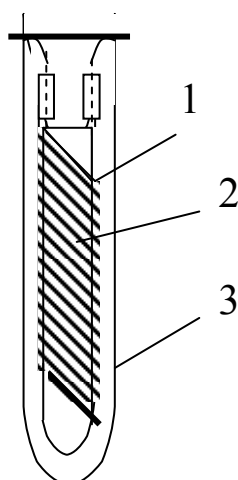


Рис. 1.3. Платиновый термометр

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

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

1.1.3. Термоэлектрические термометры (термопары)

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

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

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

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

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

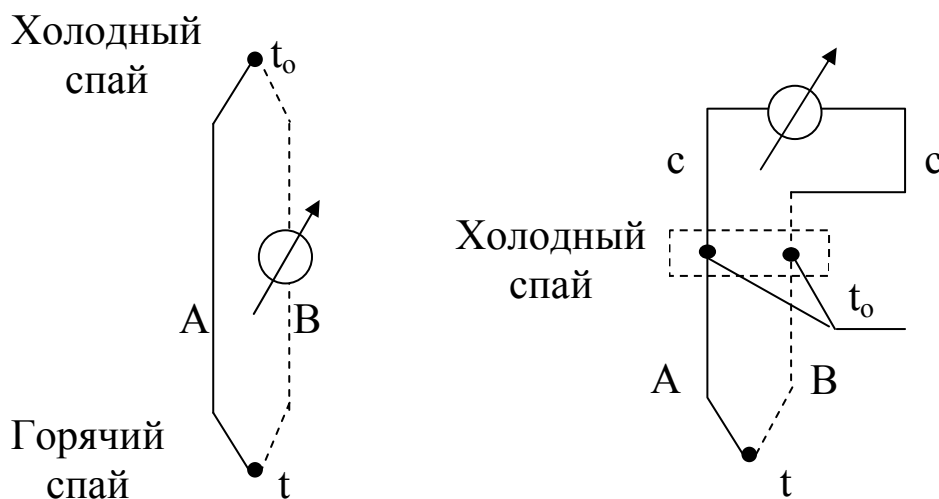


Рис.1.4. Схемы термоэлектрических цепей

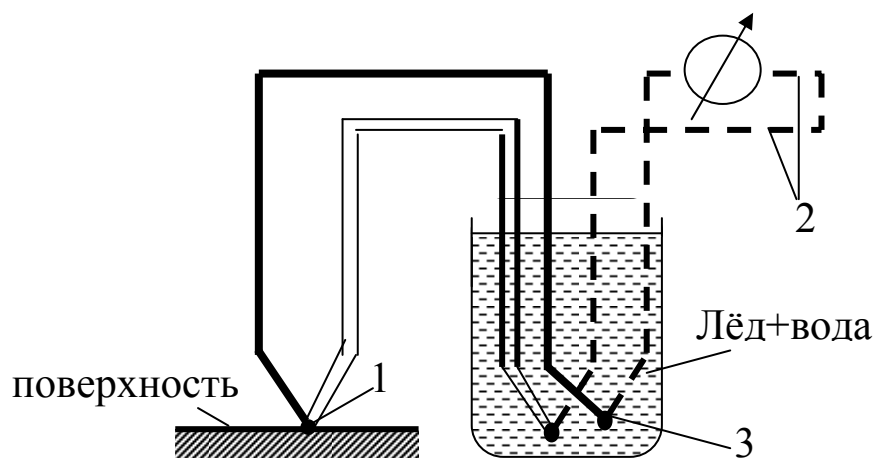


Рис.1.5. Схема подключения термопары к измерительному прибору 1-горячий спай; 2- медные провода; 3-холодный спай

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

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

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

Пределы измерения температур стандартными термопарами представлены в табл. 1.2.

Таблица 1.2 - Характеристика стандартных термопар

Наименование термопары	Тип	Термо-э.д.с. t ₀ =0°С, t=100°С	Верхний предел, °С	
			при длительном применении	при кратковременном применении
Платинородий (90%Pt+10%Rt)-платина	ТПП	1,04	1300	1600
Хромель (90%Ni+10%Cr 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 кгс/м^2 (1 кгс/см^2) - техническая атмосфера.

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

$$p = \rho \cdot g \cdot h, \quad (1.4)$$

где p — давление, Н/м^2 ;

h — высота столба жидкости, м;

ρ — плотность жидкости, кг/м^3 ;

g — ускорение силы тяжести в точке измерения, м/с^2 .

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

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

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

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

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

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

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

Связь между единицами давления

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

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

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

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

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 уравновешивается 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 кгс/см^2) и разрежений.

2.1.1. U-образный манометр (вакуумметр)

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

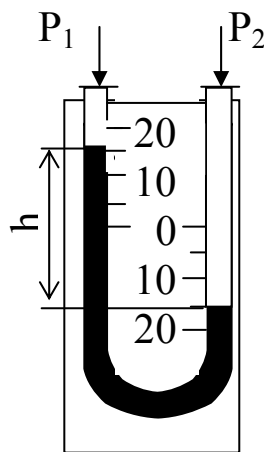


Рис.1.6. U-образный жидкостный манометр

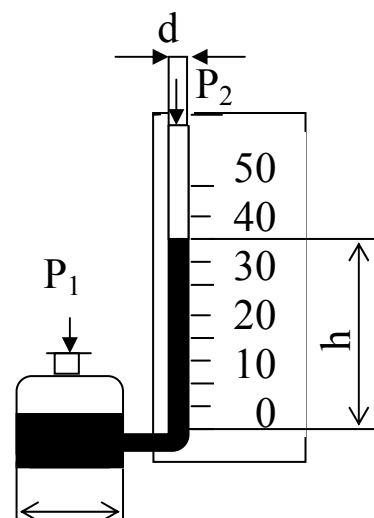


Рис.1.7. Чашечный жидкостный манометр

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

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

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

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

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

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

2.1.2. Микроманометры

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

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

где P — давление, мм столба жидкости;

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

α — угол наклона трубки к горизонтали.

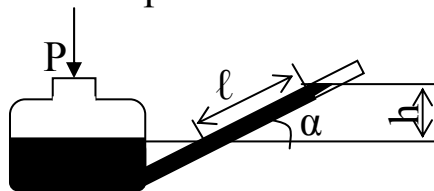


Рис.1.8. Схема микроманометра с наклонной трубкой

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

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

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

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

где 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, сифонов.

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

2.2.1. Манометры с трубчатой пружиной

Рабочей частью манометра (рис.1.9) служит изогнутая стальная или латунная трубка (трубчатая пружина). Одним концом она впаяна в штуцер, которым манометр присоединяется к сосуду, где требуется измерить давление. Трубка 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.1.10). Мембранные приборы нашли широкое применение при измерении низких давлений и разрежений, в тягомерах и напоромерах.

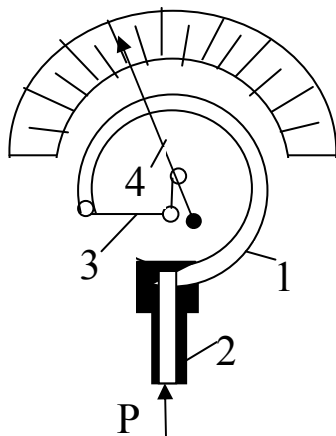


Рис.1.9. Манометр с трубчатой пружиной

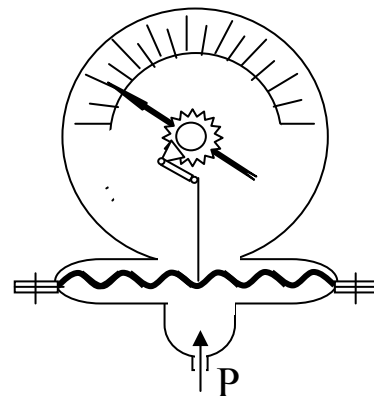


Рис.1.10. Схема мембранного манометра

2.2.3. Дифференциальные манометры

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

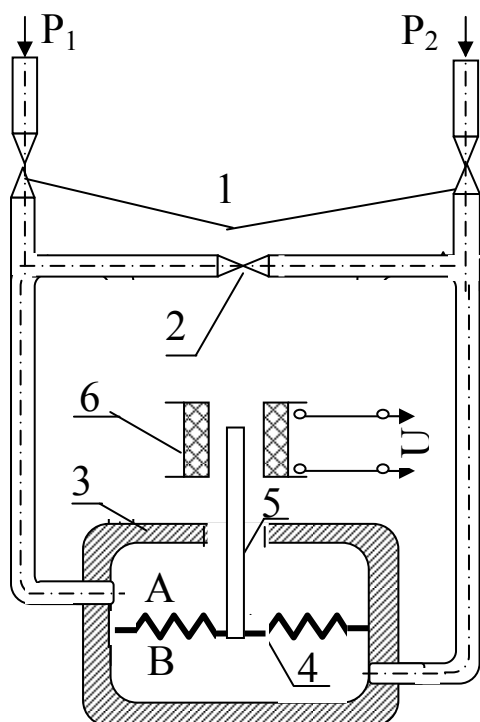


Рис.1.11. Дифференциальный мембранный манометр

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

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

является то, что он выдерживает практически любые перегрузки.

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

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

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

2.3. Поршневые манометры

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

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

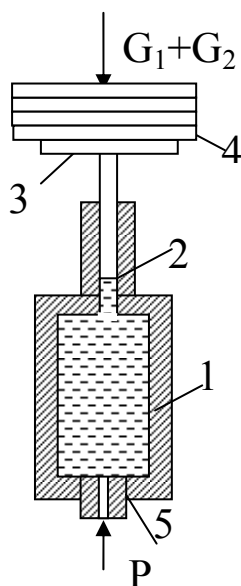


Рис 1.12 .Схема грузопоршневого манометра

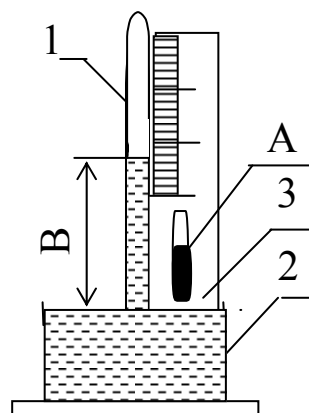


Рис.1.13. Схема ртутного чашечного

2.4. Барометры

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

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

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

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

3. ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ И РАСХОДА ЖИДКОСТЕЙ, ГАЗОВ И ПАРОВ

Приборы для измерения расхода разделяются на 2 большие группы:

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

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

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. 1.14.

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

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

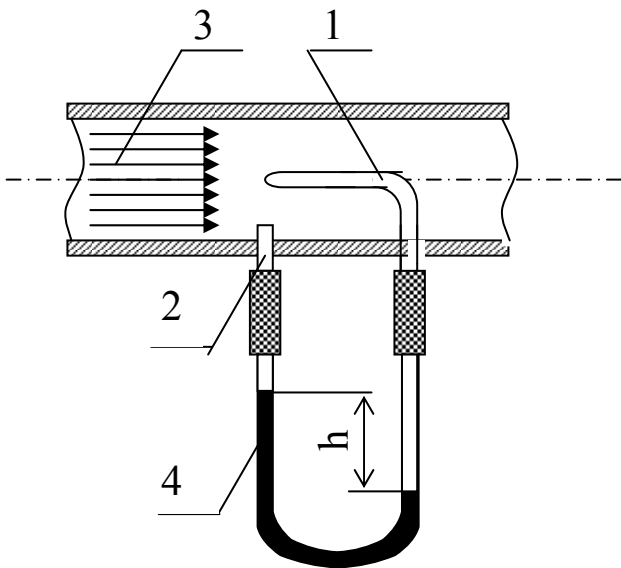


Рис.1.14. Схема замера динамического давления
 1- трубка полного давления;
 2- трубка для отбора статического напора;
 3- измеряемый поток;
 4- U-образный манометр

дифманометре и вещества, находящегося над рабочей жидкостью, кг/м^3 , то:

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

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. Перепад давлений в дроссельных устройствах измеряется дифманометрами.

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

где w — скорость движения среды, м/с;

ρ — плотность среды, кг/м^3 ;

g — ускорение силы тяжести, м/с^2 ;

$P_{\text{д}}$ — динамическое давление, кг/м^2 .

Отсюда скорость потока

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

Т.к. разность давлений:

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

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

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

Дроссельные устройства называют приборами переменного перепада.

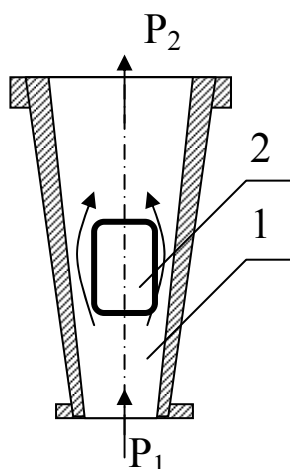


Рис.1.15. Ротаметр

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

При протекании измеряемого вещества внутри трубы прибора 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, уравнивается весом поплавка. Положение верхней грани поплавка указывает по шкале прибора величину расхода.

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

Контрольные вопросы

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

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

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

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

Лабораторная работа № 2.

«ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИЗОБАРНОЙ ТЕПЛОЁМКОСТИ ВОЗДУХА»

Целью работы является закрепление знаний по разделу «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°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 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 μc связаны между собой соотношениями:

$$c = \mu c / \mu = c' / \rho; \quad (2.1)$$

$$c' = \rho \cdot c = c / 22,4; \quad (2.2)$$

$$\bar{c} = \mu c = \mu \cdot c = c' \cdot 22,4 \quad (2.3)$$

где μ — молекулярная масса газа, кг/кмоль;

ρ — плотность газа при нормальных физических условиях, кг/м³.

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.

$$c = dq/dt = a + b \cdot t + d \cdot t^2, \quad (2.4)$$

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 $[c]_{t_1}^{t_2}$. В интервале температур от t_1 до t_2 средняя теплоемкость определяется по формуле:

$$c \Big|_{t_1}^{t_2} = \frac{q}{t_2 - t_1}, \quad (2.5)$$

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 (уравнение Майера):

$$c_p - c_v = R, \quad (2.6)$$

$$\mu c_p - \mu c_v = 8314, \quad (2.7)$$

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 0-2500⁰С с интервалом 100⁰С. 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 :

$$c \Big|_{t_1}^{t_2} = \frac{c \Big|_0^{t_2} \cdot t_2 - c \Big|_0^{t_1} \cdot t_1}{t_2 - t_1} \quad (2.8)$$

Количество теплоты, затрачиваемой для нагрева G кг, или V м³, или M молей газа от t_1 до t_2 , находятся по формулам, Дж:

$$Q = G \cdot c \Big|_{t_1}^{t_2} (t_2 - t_1); \quad (2.9)$$

$$Q = V c' \Big|_{t_1}^{t_2} (t_2 - t_1); \quad (2.10)$$

$$Q = M \cdot \bar{c} \Big|_{t_1}^{t_2} (t_2 - t_1). \quad (2.11)$$

Теплоемкость газовой смеси равна:

$$\text{- массовая } c_{см} = \sum_{i=1}^n g_i \cdot c_i; \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)} \quad (2.12)$$

$$\text{- объемная } c'_{см} = \sum_{i=1}^n r_i \cdot c'_i; \text{ Дж/(м}^3 \cdot \text{К)} \quad (2.13)$$

$$\text{- мольная } \bar{c}_{см} = \sum_{i=1}^n r_i \cdot \bar{c}_i; \text{ Дж/(кмоль} \cdot \text{К)}. \quad (2.14)$$

где g_i , r_i — массовые и объемные доли газовой смеси, соответственно.

Описание установки и методики эксперимента

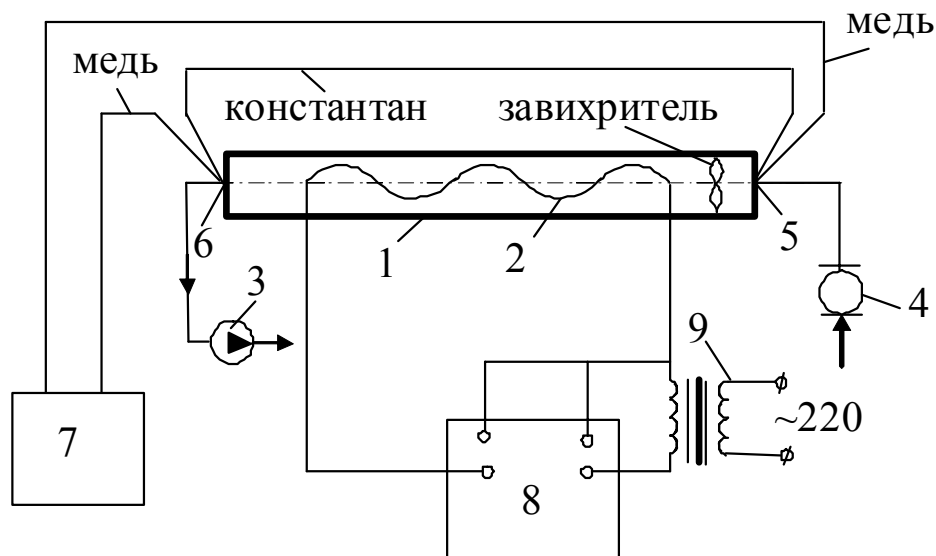


Рис.2.1.Схема экспериментальной установки

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 ΔV м³ воздуха.

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

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

Результаты измерений занести в таблицу 2.1.

Таблица 2.1. – Опытные данные

Номера замеров	Q, Вт	ΔV , м ³	τ , с	P ₀ , Па	t ₀ , °C	E, mV
1						
2						
3						

Обработка опытных данных

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

$$G = \rho \cdot \Delta V / \tau, \quad (2.15)$$

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

2. Плотность воздуха вычисляем из уравнения Клапейрона по формуле:

$$\rho = p_0 / (R \cdot T), \quad (2.16)$$

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

p_0 — давление атмосферного воздуха, Па;

T_0 — абсолютная температура атмосферного воздуха, К,

$$T_0 = 273 + t_0; \quad (2.17)$$

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

$$\Delta t = 24,5 \cdot E, \quad (2.18)$$

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:

$$c_p = 0,98 \cdot Q / (G \cdot \Delta t), \quad (2.19)$$

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

Q — мощность электронагревателя, Вт.

Контрольные вопросы

1. Что называется теплоемкостью воздуха?
2. Какие виды теплоемкости вы знаете?
3. Дайте определение удельной массовой теплоемкости.
4. Дайте определение удельной объемной теплоемкости.
5. Дайте определение удельной мольной теплоемкости.
6. Что такое изобарная теплоемкость, изохорная теплоемкость? Чем они отличаются?
7. Формула Майера. Физический смысл газовой постоянной.
8. Используя уравнение Клапейрона, получить формулу для вычисления плотности воздуха.
9. Напишите формулы для определения количества теплоты, если задана удельная массовая теплоемкость, удельная объемная теплоемкость, удельная мольная теплоемкость.
10. Схема экспериментальной установки и порядок проведения работы.

Лабораторная работа № 3.

«ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗОВОГО 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 (идеального), называется изотермическим процессом, а линия, изображающая этот процесс — изотермой. Уравнение изотермы в p - v диаграмме вытекает из уравнения состояния $pv = RT$ при $T = \text{const}$ в следующем виде $pv = \text{const}$, а график изотермы — это равнобокая гиперболола (рис.3.1).

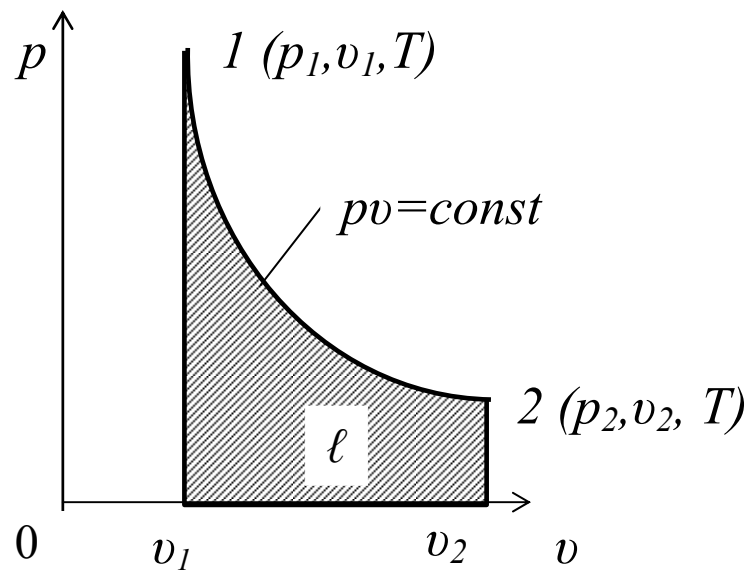


Рис. 3.1. Изотермический процесс в $p - v$ диаграмме

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

$$p_2/p_1 = v_1/v_2. \quad (3.1)$$

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

$$\begin{aligned} \ell &= \int_{v_1}^{v_2} p dv = \text{const} \int_{v_1}^{v_2} \frac{dv}{v} = RT \ln(v_2/v_1) = \\ &= p_1 v_1 \ln(v_1/v_2) = RT \ln(p_1/p_2) \end{aligned} \quad (3.2)$$

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 ℓ 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 ℓ имеет знак (-) и вся затраченная работа ℓ отводится от газа в виде теплоты q .

В T - S диаграмме изотерма ($T = \text{const}$) будет горизонтальной прямой 1-2 (рис.3.2).

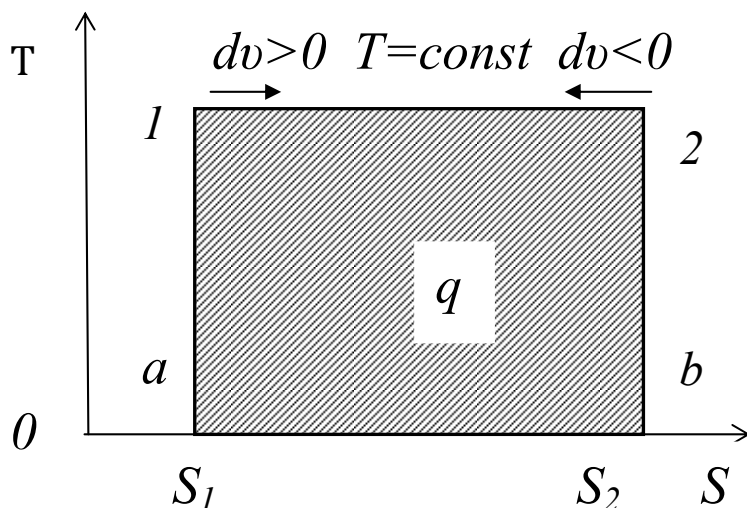


Рис. 3.2. Изотермический процесс в $T - S$ диаграмме

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

$$S_2 - S_1 = q/T = R \cdot \ln(v_2/v_1). \quad (3.3)$$

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

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

Итак, для изотермического процесса можно записать

$$P_1 \cdot V_1 = P_2 \cdot V_2 = P_3 \cdot V_3 = P \cdot V = \text{const},$$

откуда $P_2 \cdot V_2 / P_1 \cdot V_1 = P_3 \cdot V_3 / P_1 \cdot V_1 = P_3 \cdot V_3 / P_2 \cdot V_2 = \text{const} = 1$.

$$(3.4)$$

Экспериментальная установка

Установка (рис.3.3) представляет собой две соединенные резиновым шлангом 1 вертикальные бюретки 2, наполовину заполненные водой.

Бюретки установлены в штативе 3. Одна бюретка герметически 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.

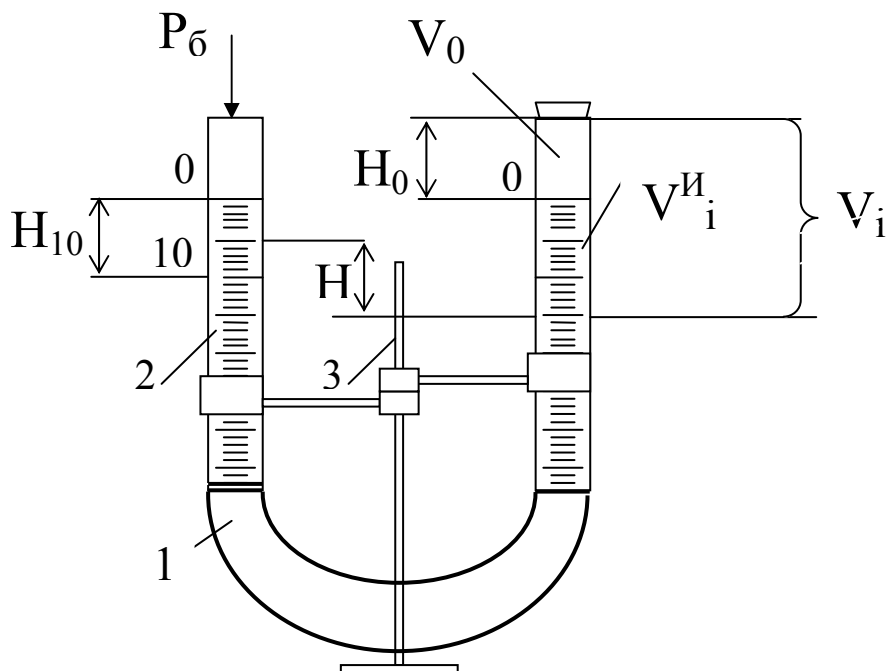


Рис. 3.3. Схема установки

Проведение опыта и обработка опытных данных

Проводится три опыта, для каждого из которых вычисляются объём воздуха V_i (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, $V_i^{\text{И}}$.

$$V_i = V_0 + V_i^{\text{И}} \quad (3.5)$$

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

$$V_0 = 10 \cdot H_0 / H_{10}. \quad (3.6)$$

(Величина V_0 для всех 3-х опытов одна и та же.)

Первый замер (рис. 3.4,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

$$V_1 = V_0 + V_1^И. \quad (3.7)$$

Второй замер (рис. 3.4,б) проводим при давлении выше атмосферного. Сжатие воздуха осуществляем поднятием открытой бюретки до получения разницы уровней воды в бюретках $100 \div 150$ мм. При этом давление воздуха в закрытой бюретке уравнивается столбом жидкости H и барометрическим давлением P_6 , т.е.

$$P_2 = P_6 + H \cdot 9,81 \text{ (Па)}. \quad (3.8)$$

Объём воздуха

$$V_2 = V_0 + V_2^И. \quad (3.9)$$

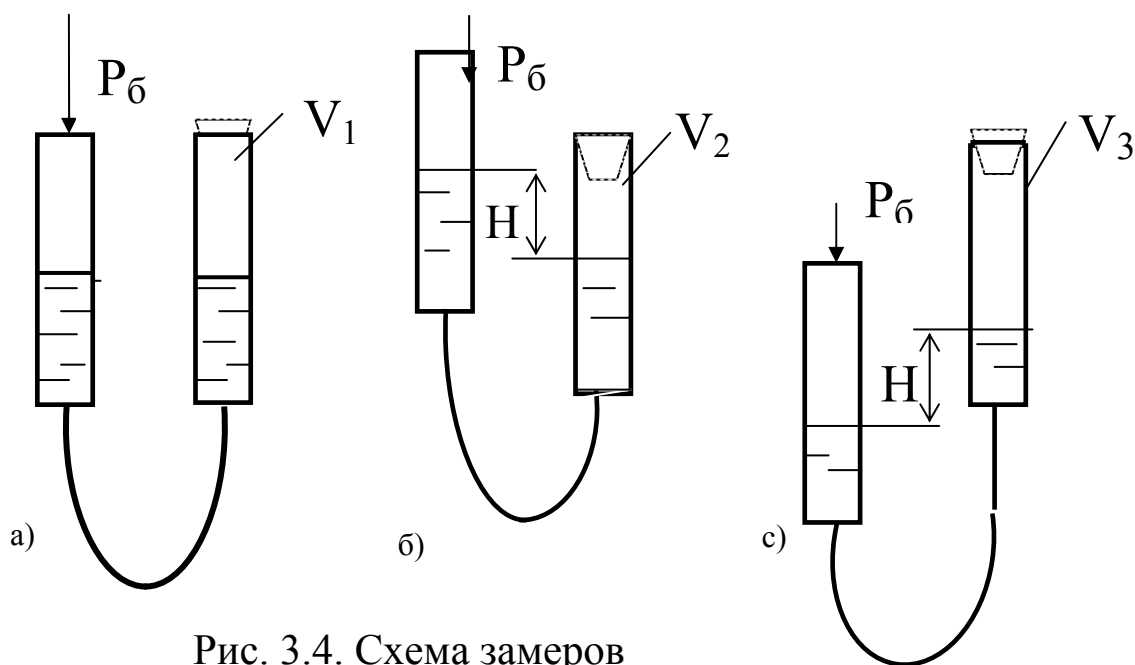


Рис. 3.4. Схема замеров

Третий замер (рис. 3.4,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.

$$P_3 = P_6 \cdot H \cdot 9,81 \text{ (Па)}. \quad (3.10)$$

Объём воздуха $V_3 = V_0 + V_1^И$. (3.11)

Для каждого замера определяем произведение давления и объёма, $P_i \cdot V_i$ (Па·м³), 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 3.1. - Протокол лабораторной работы

Пара метр	Измеряемый объём воздуха по шкале, $V_i^И$	Полный объём, $V_i = V_0 + V_i^И$		Разность уровней, Н	Абсолютное давление, P_i	Произведение, $P_i \cdot V_i$
		мл	м ³			
№ за-мера	мл	мл	м ³	мм. вод.ст.	Па	Па·м ³
1						
2						
3						
Атмосферное давление $P_6 =$ Па; Объём, заключенный между пробкой и нулевой отметкой шкалы, $V_0 =$ мл						

Контрольные вопросы

1. Понятия идеального и реального газа.
2. Основные термодинамические процессы.
3. Что называется изотермическим процессом?
4. Изображение изотермического процесса в P-V и T-S координатах. Определение теплоты и работы.
5. Как определить работу изотермического процесса? Чему она равна?
6. Как определить теплоту изотермического процесса?

7. Описание лабораторной установки и ход проведения опыта.
8. Основное уравнение изотермического процесса и взаимосвязь параметров газа.

Лабораторная работа № 4.

«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 (B) равно сумме парциальных давлений сухого воздуха ($P_{с.в}$) и водяного пара ($P_{п}$), т.е.

$$B = P_{с.в} + P_{п} \quad (4.1)$$

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;
- **туман** — если пар, входящий в состав воздуха, является влажным.

Практическое применение имеет ненасыщенный воздух.

Основными параметрами влажного воздуха являются:

1. **Абсолютная влажность** $\rho_{\text{п}}$, кг/м³ — масса водяного пара ($m_{\text{п}}$), содержащаяся в 1 м³ влажного воздуха, т.е.

$$\rho_{\text{п}} = m_{\text{п}}/V_{\text{в.в.}} \quad (4.2)$$

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

$$\phi = \rho_{\text{п}}/\rho_{\text{н}} \quad (4.3)$$

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

$$v_{\text{н}}/v_{\text{п}} = P_{\text{п}}/P_{\text{н}} \quad (4.4)$$

или

$$\rho_{\text{п}}/\rho_{\text{н}} = P_{\text{п}}/P_{\text{н}} \quad (4.5)$$

следовательно,

$$\phi = P_{\text{п}}/P_{\text{н}}, \quad (4.6)$$

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 ($P_{\text{н}}$).

Относительная влажность может быть выражена либо в долях единицы, либо в %. Если $\phi=1$ или $\phi=100$ %, то воздух насыщенный; если $\phi=0$, то воздух сухой; если воздух ненасыщенный, то ϕ 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 св. или в г/кг с.в.:

$$d = m_{\text{п}}/m_{\text{с.в.}} \quad (4.7)$$

Используя уравнение Клапейрона для смеси идеальных газов, при d , измеряемом в [г/кг с.в.], имеем

$$d = 622 \square P_{\text{п}}/(B - P_{\text{п}}) \quad (4.8)$$

или при d , измеряемом в [кг/кг с.в.]

$$d = 0,622 \square P_{\text{п}}/(B - P_{\text{п}}) \quad (4.9)$$

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

$$\psi = d/d_{\max} \quad (4.10)$$

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

$$H = h_{c.в} + h_{п.} \cdot d \quad (4.11)$$

В соответствии с установившейся практикой энтальпии сухого воздуха и воды отсчитываются от 0°C , тогда

$$h_{c.в} = C_p \cdot t \quad (4.12)$$

$$h_{п.} = r + C_p^{\text{п}} \cdot t, \quad (4.13)$$

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

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

$$H = t + (2501 + 1,93 \cdot t) \cdot d \quad (4.14)$$

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_m .

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 $t > t_m > t_p$. Для насыщенного воздуха все три температуры одинаковы, $t = t_m = t_p$.

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° . Диаграмма построена для среднего атмосферного давления в 745 мм. рт. ст. (см. приложение А).

Каждая точка диаграммы соответствует определенному состоянию влажного воздуха. Для определения состояния воздуха в $H-d$ диаграмме должны быть заданы любые два параметра: t и ϕ , t и t_m , 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_m) термометров воздуха в помещении.

Используя полученные значения температур по $H-d$ диаграмме влажного воздуха, находим положение точки 1, соответствующей данному состоянию воздуха, рис. 4.1. Через полученную точку проводим линию относительной влажности, $\phi_1 = \text{Const}$, линии влагосодержания, $d_1 = \text{Const}$ и энтальпии, $H_1 = \text{Const}$.

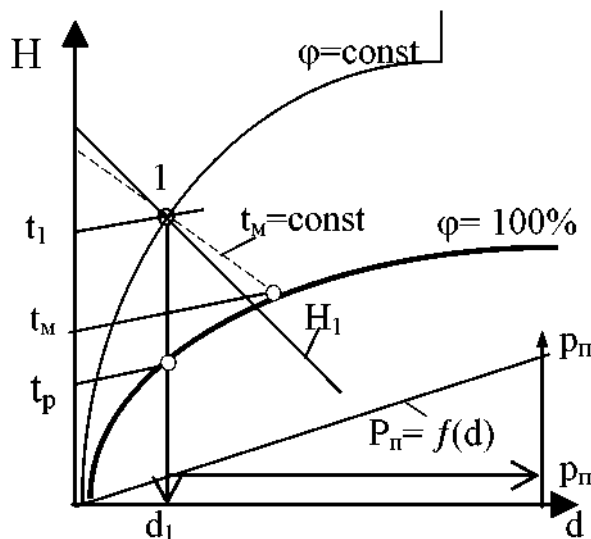


Рис.4.1. Определение параметров воздуха по $H-d$ диаграмме

Температура точки росы находится на пересечении линии $d_1 = \text{const}$ и пограничной кривой $\varphi = 100\%$.

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:

$$p_{\text{с.в.1}} = B - p_{\text{п1}}, \quad (4.15)$$

где B — давление атмосферного воздуха.

2 этап. По H - d диаграмме проследим возможные процессы охлаждения заданного воздуха (рис. 4.2):

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

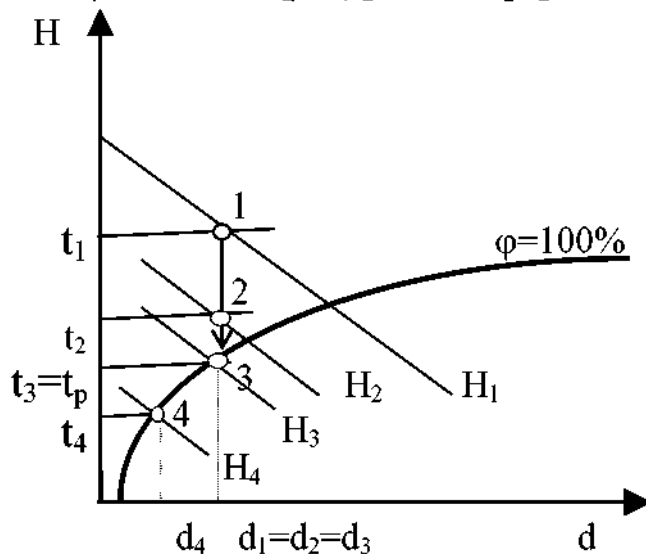


Рис.4.2 Охлаждение воздуха

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. , кДж/кг с.в.:

$$\begin{aligned} q_{1-2} &= H_1 - H_2 \\ q_{1-3} &= H_1 - H_3 \\ q_{1-3-4} &= H_1 - H_4 \end{aligned} \quad (4.16)$$

Для процесса 1-3-4 определяем количество образовавшегося конденсата, г/кг с.в.:

$$m=d_1 - d_4 \quad (4.17)$$

3 этап. Нагреваем исходный воздух (рис. 4.3) на Δt °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, г/кг с.в.:

$$\begin{aligned} m_{1-7} &= d_7 - d_1 \\ m_{5-6} &= d_6 - d_1 \end{aligned} \quad (4.18)$$

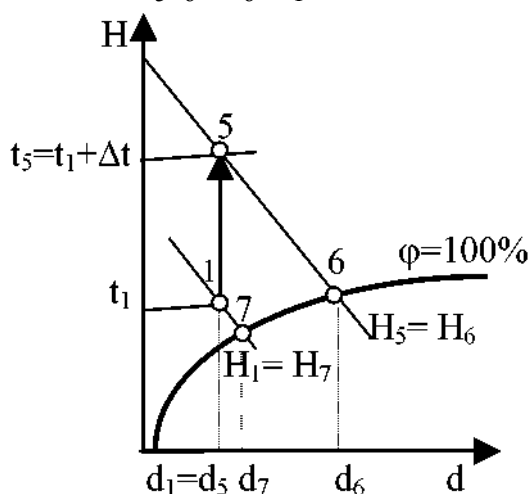


Рис. 4.3. Процессы нагревания воздуха и испарения

Параметры, снятые с H-d диаграммы необходимо уточнить по справочнику. После этого результаты работы записать в протокол испытаний (таблицу 4.1).

Таблица 4.1 - Протокол испытаний

Точка	Исходное состояние	Параметры состояний					
		φ , %	d , г/кг с.в.	H , кДж/кг с.в.	t_p , °С	P_p , кПа	$P_{с.в.}$, кПа
1	$t_1 =$; $t_{M1} =$						
2	$t_2 =$; $d_2 = d_1$						
3	$\varphi = 100\%$; $d_3 = d_1$	100					
4	$\varphi = 100\%$; $t_4 =$	100					
5	$t_5 =$; $d_5 = d_1$				-	-	-
6	$\varphi = 100\%$; $H_6 = H_5$	100			-	-	-

7	$\varphi=100\%$; $H_7=H_1$	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.

Лабораторная работа № 5.

«ИСПЫТАНИЕ ОДНОСТУПЕНЧАТОГО ПОРШНЕВОГО КОМПРЕССОРА»

Целью работы является углубление знаний по теории, конструкции и методике испытаний поршневых компрессоров.

Задание

1. Определить производительность, коэффициент подачи, показатель политропы сжатия, работу, затраченную на сжатие воздуха, мощность, потребляемую компрессором, к.п.д. компрессора.
2. Составить отчет по работе.

Теоретическая часть

Машины для сжатия газов называются компрессорами. В зависимости от принципа сжатия их можно разделить на две основные группы: 1) машины объемного сжатия — повышение давления газа происходит за счёт уменьшения объёма рабочего пространства. К этой группе машин относятся поршневые компрессоры с возвратно-поступательным движением поршней и

различные типы ротационных компрессоров с вращающимися поршнями; 2) машины кинетического сжатия — процесс сжатия проходит при принудительном установившемся движении, полученная кинетическая энергия переходит в энергию давления при торможении газового потока. К этой группе относятся центробежные и осевые машины.

Различают одноступенчатое и многоступенчатое сжатие газов в компрессорах.

На рис. 5.1. представлена схема одноступенчатого поршневого компрессора.

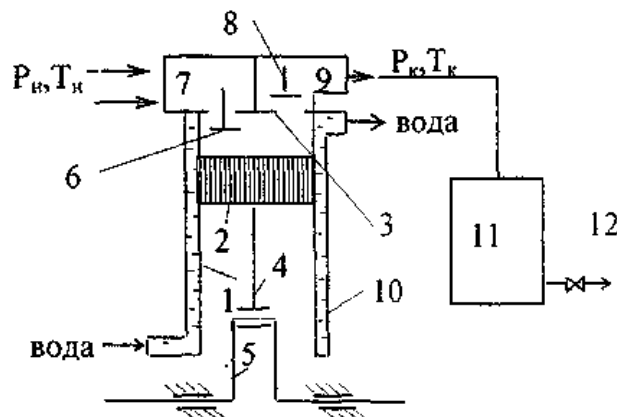


Рис. 5.1. Схема одноступенчатого поршневого компрессора

1 — цилиндр; 2 — поршень; 3 — крышка цилиндра; 4 — шатун; 5 — кривошип; 6 — впускной клапан; 7 — впускной патрубок; 8 — выпускной клапан; 9 — выпускной патрубок; 10 — водяная рубашка охлаждения цилиндра; 11 — ресивер; 12 — подача газа к потребителю.

Если при крайнем верхнем положении поршня отсутствует зазор между крышкой цилиндра и днищем поршня, то такой компрессор называется идеальным. При движении поршня сверху вниз возникает разрежение, за счет чего впускной клапан автоматически открывается и цилиндр наполняется газом по изобаре $a-1$ при давлении P_n . Точка b соответствует крайнему нижнему положению поршня. При движении поршня снизу вверх происходит сжатие газа в цилиндре, при закрытых клапанах. Сжатие может происходить по адиабате $1-2''$, политропе $1-2$ или по изотерме $1-2'$ (рис. 5.2) Характер процесса сжатия определяется

интенсивностью охлаждения цилиндра компрессора. Обычно сжатие политропное, показатель политропы $n=1,2 \div 1,25$.

При достижении в цилиндре давления P_k выпускной клапан автоматически открывается, и сжатый газ нагнетается в ресивер по изобаре $2-b$ или $2'-b$ или $2''-b$. При следующем ходе поршня в цилиндр поступает новая порция газа и все процессы повторяются.

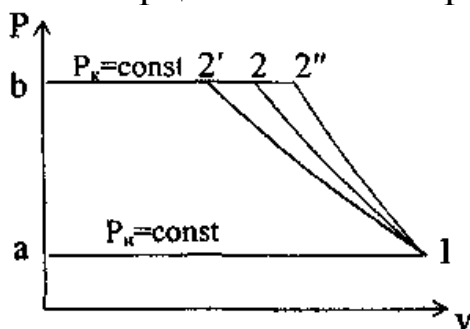


Рис. 5.2. Процессы сжатия в идеальном одноступенчатом поршневом компрессоре в P-v диаграмме

При адиабатном сжатии газа в компрессоре затрачивается работа l_a , равная площади фигуры $a-1-2''-b-a$:

$$l_a = \frac{k}{k-1} R \cdot T_n \left[\left(\frac{P_k}{P_n} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \quad (5.1)$$

где k — показатель адиабаты; R — индивидуальная газовая постоянная газа, Дж/(кг·К); $\pi = \frac{P_k}{P_n}$ — степень повышения давления.

При политропном сжатии газа в компрессоре затрачивается работа l_n , равная площади фигуры $a-1-2-b-a$:

$$l_n = \frac{n}{n-1} R \cdot T_n \left[\left(\frac{P_k}{P_n} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right]. \quad (5.2)$$

При изотермическом сжатии газа в компрессоре затрачивается работа l_u , равная площади фигуры $a-1-2'-b-a$:

$$l_u = K \cdot T_n \cdot \ln \left(\frac{P_k}{P_n} \right) \quad (5.3)$$

Охлаждение цилиндра компрессора в процессе сжатия позволяет получить экономию работы, равную площади фигуры $1-2''-2-1$, и, кроме того, снижает температуру конца сжатия (см. рис. 5.3).

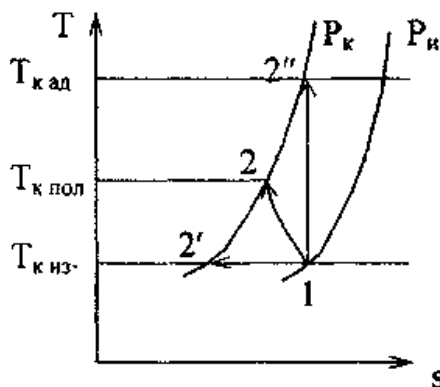


Рис. 5.3. Процесс сжатия газа в одноступенчатом поршневом компрессоре в T - s диаграмме

При сжатии по адиабате $1-2''$ температура конца сжатия равна $T_{к.ад.}$, при политропном сжатии $1-2$ — $T_{к.пол.}$, а при изотермическом сжатии $1-2'$ температура конца сжатия $T_{к.из.} = T_H$.

На рис. 5.4 представлена теоретическая индикаторная диаграмма реального одноступенчатого компрессора.

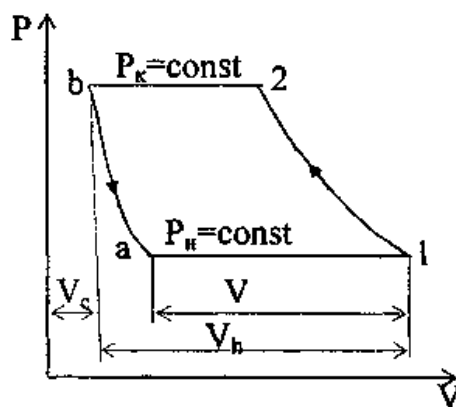


Рис. 5.4. Теоретическая индикаторная диаграмма реального одноступенчатого компрессора

В реальном компрессоре обязательно имеется зазор между крышкой цилиндра и днищем поршня, то есть имеет место объём (мёртвого) пространства, который обозначают V_c . При движении поршня сверху вниз газ, находящийся во вредном пространстве,

расширяется по политропе $b-a$ до тех пор, пока в цилиндре не возникнет некоторое растяжение. При давлении P_n впускной клапан откроется, и в цилиндр будет поступать свежий заряд газа по изобаре $a-1$. При движении поршня снизу вверх газ сжимается в цилиндре при закрытых клапанах по политропе $1-2$. В точке 2 автоматически открывается выпускной клапан и происходит нагнетание газа в ресивер по изобаре $2-b$. При следующем ходе поршня газ, находящийся во вредном пространстве, расширяется и все процессы повторяются.

Объём, описываемый поршнем за один ход, называют рабочим объёмом и обозначают V_n . Объём газа, поступающего в цилиндр в процессе наполнения обозначают V .

Отношение V/V_n называют объёмным к.п.д. компрессора. Объёмный к.п.д. зависит от величины объёма вредного пространства V_c и степени повышения давления $\pi = P_k/P_n$. Вследствие того что объёмный к.п.д. не учитывает температурных изменений газа в процессе всасывания и утечки через неплотности для характеристики действительной производительности компрессора, пользуются коэффициентом подачи λ .

Для того, чтобы уменьшить влияние объёма вредного пространства на производительность компрессора, а также, чтобы снизить температуру конца сжатия, применяют многоступенчатое сжатие.

На рис. 5.5 представлена схема двухступенчатого поршневого компрессора. Процесс сжатия газа в многоступенчатых компрессорах осуществляется последовательно во всех ступенях с охлаждением газа после сжатия в каждой ступени. Наиболее выгодным оказывается многоступенчатое сжатие в случае, если степень повышения давления одинаковые во всех ступенях.

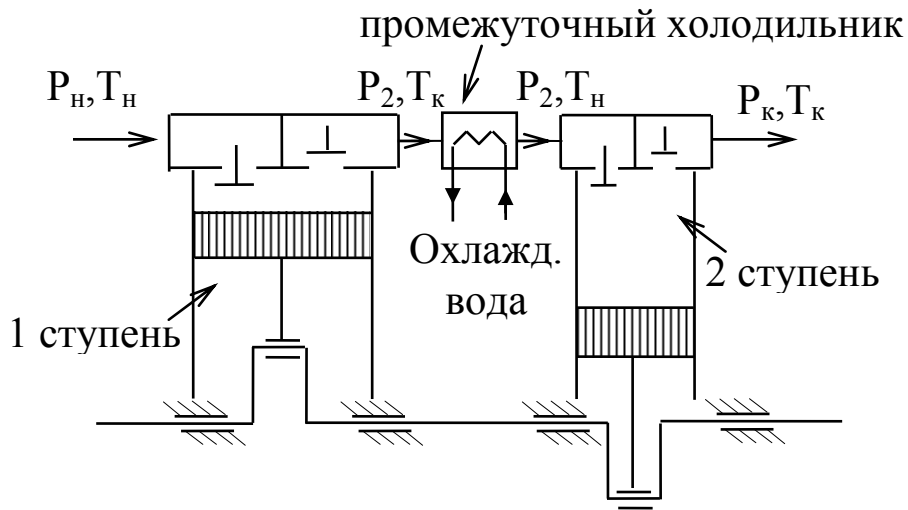


Рис. 5.5. Схема двухступенчатого поршневого компрессора

На рис. 5.6 показан процесс сжатия газа в двухступенчатом поршневом компрессоре, где $a-1$ — процесс наполнения первой ступени; $1-2$ — политропное сжатие газа в первой ступени; $2-b$ — процесс нагнетания сжатого газа по изобаре P_2 в промежуточный холодильник; $2-3$ — изобарное охлаждение газа в промежуточном холодильнике до температуры $T_{н1}$; $b-3$ — процесс наполнения цилиндра второй ступени; $3-4$ — политропное сжатие во второй ступени; $4-c$ — процесс нагнетания сжатого газа при давлении P_k в ресивер.

Площадь фигуры $a-1-2-b$ равна работе, затрачиваемой на сжатие газа в первой ступени; площадь фигуры $b-3-4-c$ равна работе, затрачиваемой на сжатие во второй ступени; площадь фигуры $a-1-5-c$ равна работе, затрачиваемой на сжатие газа в одноступенчатом компрессоре от давления P_n до того же давления P_k ; площадь фигуры $2-3-4-5$ равна экономии работы за счет двухступенчатого сжатия с промежуточным охлаждением.

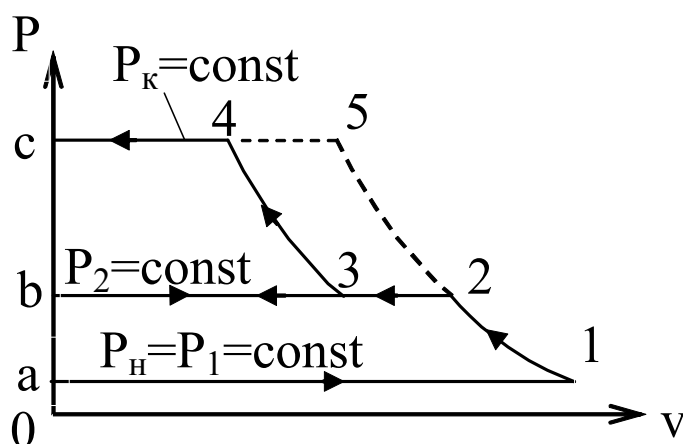


Рис. 5.6. Процесс сжатия в двухступенчатом поршневом компрессоре

Таким образом, применение двухступенчатого сжатия с промежуточным охлаждением дает экономию в работе и снижает температуру конца сжатия газа.

Степень повышения давления в каждой ступени равна

$$\pi_1 = \pi_2 = \sqrt{\frac{P_K}{P_H}}. \quad (5.4)$$

При этом во всех ступенях компрессора затрачивается одинаковая работа

$$l_1 = l_2 = \frac{n}{n-1} \cdot R \cdot T_H \cdot \left(\pi_1^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right), \quad (5.5)$$

где n — показатель политропы сжатия.

Мощность, затрачиваемая на привод компрессора

$$N_K = \frac{G \cdot (l_1 + l_2) \cdot 10^{-3}}{\eta_K}, \quad (5.6)$$

где G — массовая производительность компрессора, кг/с;

η_K — к.п.д. компрессора.

Описание опытной установки

Схема опытной установки представлена на рис. 5.7. Установка содержит двухцилиндровый одноступенчатый компрессор 1, электродвигатель 2, вращающий вал компрессора через клиноременную передачу, счетчик газа 3, ресивер 4 для сглаживания пульсации потока воздуха, пружинный вакуумметр 5,

два последовательно соединенных ресивера 6 для сбора сжатого воздуха, пружинный манометр 7, предохранительный клапан 8, штуцеры 9, для подачи сжатого воздуха к потребителю, пробковые краны 10, ваттметр 11, хромель — копелевую термопару 12, установленную на трубопроводе сжатого воздуха 13 и подключенную к милливольтметру 14.

Число оборотов вала компрессора измеряется тахометром. Количество воздуха (производительность компрессора), поступающего в компрессор, измеряется при помощи счетчика газа, установленного на ресивере 4. Внешняя поверхность цилиндров компрессора оребрена и обдувается потоком воздуха, создаваемым шестью радиальными лопастями, укрепленными на приводном шкиве компрессора.

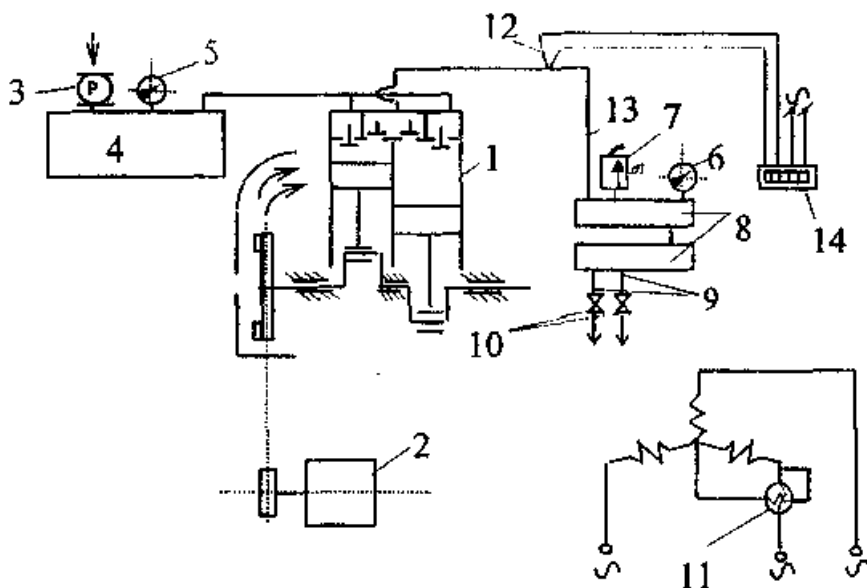


Рис. 5.7. Схема экспериментальной установки.

1 — поршневой компрессор; 2 — электродвигатель; 3 — газовый счетчик; 4 — ресивер; 5 — вакуумметр; 6 — ресиверы компрессора; 7 — манометр; 8 — предохранительный клапан; 9 — штуцеры; 10 — пробковые краны; 11 — ваттметр; 12 — хромель-копелевая термопара; 13 — трубопровод сжатого воздуха; 14 — милливольтметр

Проведение опыта

Перед запуском компрессора для снижения пусковых токов электродвигателя необходимо полностью открыть пробковые

краны. Нужно проверить, чтобы пределы ваттметра были установлены: по току “ $J=25A$ ”, по напряжению “ $U=303B$ ”. Включить установку и через несколько секунд переставить штекерами ваттметра предел по току с 25 на 10 А. После этого, закрывая пробковые краны, установить давление сжатого воздуха по манометру $P_M=2-3$ кгс/см², прогреть компрессор в течении 10-15 мин. Когда компрессор прогреется, то показания милливольтметра не будет изменяться и его показание будет соответствовать температуре конца сжатия t_2 °С. При помощи счетчика газа и секундомера находим время τ , за которое через счётчик пройдёт объём воздуха $\Delta=0,5-1,0$ м³. Тахометром измеряем число оборотов вала компрессора n_b , об/мин. Снижаем показания ваттметра по мощности n_p , по току n_j напряжению n_u . По барометру находим давление атмосферного воздуха $P_б$, а по жидкостеклянному термометру — его температуру t °С. Результаты измерений заносим в протокол испытаний (таблицу 5.1). После проведения всех измерений выключить установку.

Таблица 5.1 – Протокол испытаний

P _б , Па	t ₀ , °С	P _м кг/см ²	t ₂ , °С	n _в , об/мин	ΔV , м ³	τ , с	Показания ваттметра (делен.)		
							n _p	n _u	n _l

Обработка опытных данных

1. Определяем рабочий объём цилиндра компрессора V_h (м³)

$$V_h = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot S. \quad (5.7)$$

где $D = 0,0875$ м — диаметр цилиндра; $S = 0,0845$ м — ход поршня.

2. Определим теоретическую объёмную производительность компрессора V_T (м³/с)

$$V_T = 2 \cdot V_h \cdot \frac{n_{\%}}{60}. \quad (5.8)$$

3. Определим действительную объёмную производительность компрессора V_{∂} (м³/с)

$$V_{\partial} = \frac{\Delta V}{\tau}. \quad (5.9)$$

4. Находим коэффициент подачи компрессора

$$\lambda = \frac{V_{\partial}}{V_T}. \quad (5.10)$$

5. Находим плотность атмосферного воздуха ρ (кг/м³)

$$\rho = \frac{P_{\bar{o}}}{287 \cdot (273 + t_0)}. \quad (5.11)$$

6. Определим действительную массовую производительность компрессора G_{∂} (кг/с)

$$G_{\partial} = \rho \cdot V_{\partial} \quad (5.12)$$

7. Вычисляем показатель политропы сжатия, используя соотношение

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \quad (5.13)$$

Откуда

$$n = \frac{\ln \frac{P_2}{P_{\bar{o}}}}{\ln \frac{P_2}{P_{\bar{o}}} - \ln \frac{t_2 + 273}{t_0 + 273}}, \quad (5.14)$$

где $P_2 = P_{\bar{o}} + 0,98 \cdot 10^5 \cdot P_M$ — абсолютное давление сжатого воздуха, Па.

8. Определим работу сжатия 1 кг воздуха l (Дж/кг)

$$l = \frac{n-1}{n} R \cdot (t_2 - t_0), \quad (5.15)$$

где $R = 287$ Дж/(кг·К) — газовая постоянная воздуха.

9. Вычисляем теоретическую мощность компрессора N_t (кВт)

$$N_T = G_{\partial} \cdot l \cdot 10^{-3}. \quad (5.16)$$

10. Определяем мощность на валу компрессора N_e , кВт:

$$N_e = 3 \cdot N_t \cdot \eta_{\bar{a}} \cdot \eta_{np} \cdot 10^{-3}, \quad (5.17)$$

где $\eta_{\bar{a}} = 0,85$ — к.п.д. электродвигателя;

$\eta_{\text{пр}}=0,92$ — к.п.д. клиноременной передачи;

N — потребляемая мощность электродвигателя, Вт:

$$N=0,01 \cdot n_p \cdot "I" \cdot "U". \quad (5.18)$$

11. Вычисляем к.п.д. компрессора

$$\eta_k = N_T / N_e. \quad (5.19)$$

12. Вычисляем косинус φ

$$\cos \varphi = N / (U \cdot I), \quad (5.20)$$

где $U=0,01 \cdot n_U \cdot "U"$, В — напряжение тока, $"U"=300$ В;

$I=0,01 \cdot n_I \cdot "I"$, А — сила тока, $"I"=10$ А.

Контрольные вопросы

1. Что называется компрессором?
2. Какие типы компрессоров существуют? Чем они отличаются?
3. Опишите сжатие воздуха в идеальном одноступенчатом компрессоре.
4. Изобразите цикл работы идеального одноступенчатого компрессора в p - V и T - S диаграмме. Расскажите, какие процессы входят в цикл работы компрессора.
5. Чему равна работа цикла компрессора? теплота, отводимая в цикле компрессора?
6. Изобразите цикл работы реального одноступенчатого компрессора в p - V и T - S диаграмме. В чем отличие от идеального компрессора?
7. Опишите сжатие воздуха в многоступенчатом компрессоре с промежуточным охлаждением.
8. Изобразите цикл работы многоступенчатого компрессора в p - V и T - S диаграмме. Расскажите, какие процессы входят в цикл работы компрессора.
9. Чему равна работа цикла по ступеням компрессора? теплота, подводимая по ступеням в цикле компрессора?
10. Описание лабораторной установки и ход проведения опыта.

Лабораторная работа № 6.

«ИСПЫТАНИЯ ПАРОВОЙ КОМПРЕССИОННОЙ ХОЛОДИЛЬНОЙ УСТАНОВКИ»

Целью работы является углубление знаний по теории и установкам для получения температур, меньших температуры окружающей среды.

Задание

1. Определить потребляемую мощность, хладопроизводительность и холодильный коэффициент.
2. Составить отчет по работе.

Теоретическая часть

Холодильные установки (холодильные машины) предназначены для понижения температуры тел ниже температуры окружающей среды и непрерывного поддержания заданной низкой температуры. Тепло, отнимаемое от охлаждаемого объекта, воспринимается холодильным агентом и передается им окружающей среде.

По виду применяемых холодильных агентов холодильные установки делятся на две группы: воздушные, в которых холодильным агентом служит воздух, и паровые, в которых в качестве холодильных агентов используются пары различных веществ с низкой температурой кипения (NH_3 , CO_2 , фреоны и др.). Паровые холодильные установки подразделяются на паровые компрессионные, парозжекторные и абсорбционные.

На рис. 6.1 изображена схема воздушной компрессионной холодильной установки, которая работает следующим образом. Воздух, охлаждающий помещение 1, поступает в компрессор 2, где сжимается по адиабате 1-2 (рис. 6.2). Сжатый горячий воздух направляется в воздухоохладитель 3, в котором охлаждается по изобаре 2-3 и передает в окружающую среду теплоту q_1 . Охлажденный сжатый воздух поступает в детандер (расширитель) 4, где расширяется по адиабате 3-4 до первоначального давления, а температура понижается до $-60\text{ }^\circ\text{C}$ или $-70\text{ }^\circ\text{C}$. Детандер помогает приводу компрессора 5 вращать вал компрессора. Холодный воздух направляется для охлаждения помещения 1, подогревается по изобаре 4-1, отнимая от охлаждаемых

тел теплоту q_2 , затем поступает в компрессор и все процессы повторяются.

Таким образом, 12341 — идеальный цикл воздушной компрессионной холодильной машины, холодильный коэффициент которой равен

$$\varepsilon = T_1 / (T_2 - T_1), \quad (6.1)$$

где T_1 — температура воздуха на входе в компрессор, а T_2 — на выходе из компрессора.

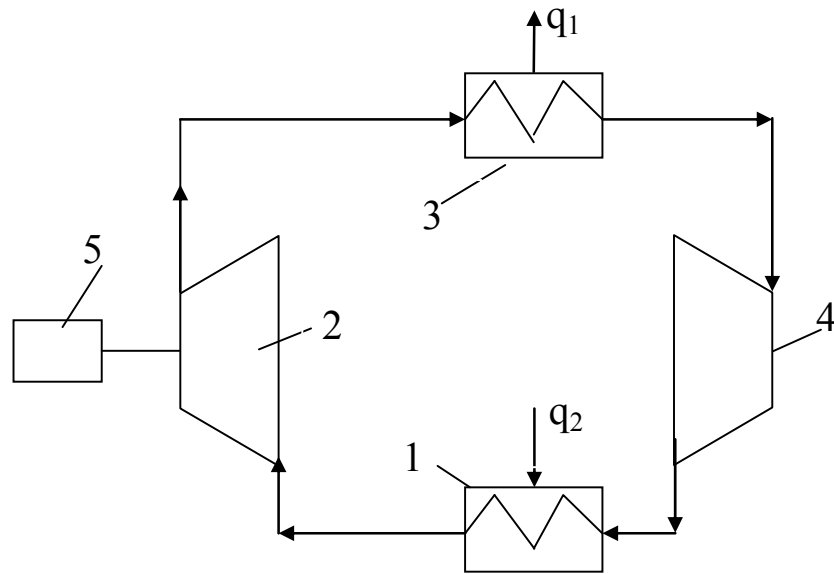


Рис. 6.1. Схема воздушной компрессионной холодильной установки: 1 — охлаждаемое помещение; 2 — компрессор; 3 — воздухоохладитель; 4 — детандер (расширитель); 5 — привод компрессора

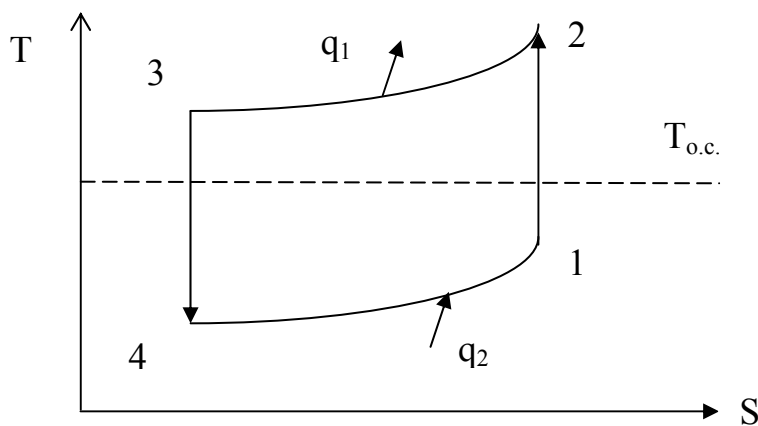


Рис. 6.2. Цикл воздушной компрессионной холодильной установки в T-S диаграмме

Цикл воздушной холодильной установки является термодинамически несовершенным, а установка малоэкономична и громоздка.

На рис. 6.3 изображена схема парожеторной холодильной установки, основными элементами которой являются парогенератор 1, эжектор 2, испаритель 3, дроссельный вентиль 4, конденсатор 5, насос 6 и охлаждаемый объект 7.

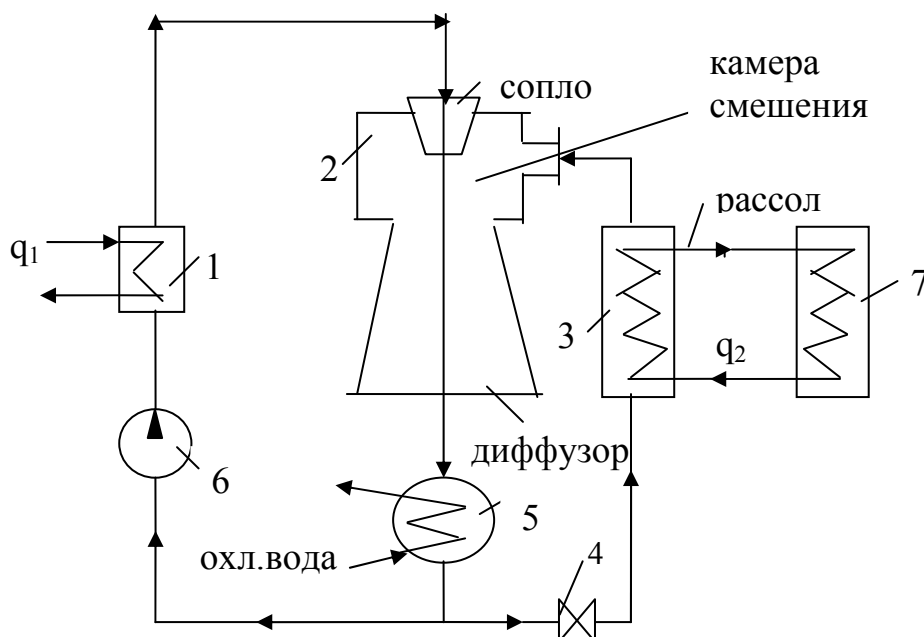


Рис. 6.3. Схема парожеторной холодильной установки

Из парогенератора 1 пар направляется в сопло эжектора, где расширяется, и поступает с высокой скоростью в камеру смешения. Сюда же из испарителя 3 подсасывается пар низкого давления, смешивается с высокоскоростным потоком пара, выходящим из сопла. В результате смешения происходит увеличение скорости подсасываемого пара. Из камеры смешения эжектора смешанный поток пара поступает в диффузор эжектора, в котором кинетическая энергия потока переходит в потенциальную энергию с повышением давления, и направляется в конденсатор 5, где, отдавая теплоту парообразования, полностью конденсируется. При выходе из конденсатора конденсат разветвляется на два потока. Один поток дросселируется в вентиле 4, в результате образуется влажный насыщенный пар, который является холодильным агентом и направляется в испаритель 3, где, получая теплоту

охлаждаемых тел q_2 , при постоянном давлении подсушивается и поступает в камеру смешения эжектора. Далее все процессы повторяются. Другой поток конденсата всасывается насосом 6 и подается в парогенератор 1, где за счет подведенной извне теплоты q_1 превращается в пар и снова поступает к соплу эжектора. Холодильный коэффициент парожеткаторной холодильной установки определяется по формуле

$$\varepsilon = q_2 / q_1. \quad (6.2)$$

Теплота q_2 отводится от охлаждаемого объекта и передается в испарителе к холодильному агенту при помощи рассола (крепкий раствор соли), который замерзает при более низкой температуре.

Существенным преимуществом парожеткаторных холодильных установок является отсутствие дорогого компрессора. Кроме того, они отличаются простотой, надёжностью в работе, малыми размерами всех агрегатов, но термодинамическое совершенство и тепловая экономичность их невысокие.

На рис. 6.4 представлена схема абсорбционной холодильной установки, включающая в себя следующие основные элементы: 1 — парогенератор; 2 — конденсатор; 3,4 — дроссельные вентили; 5 — испаритель; 6 — охлаждаемый объект; 7 — абсорбер; 8 — насос.

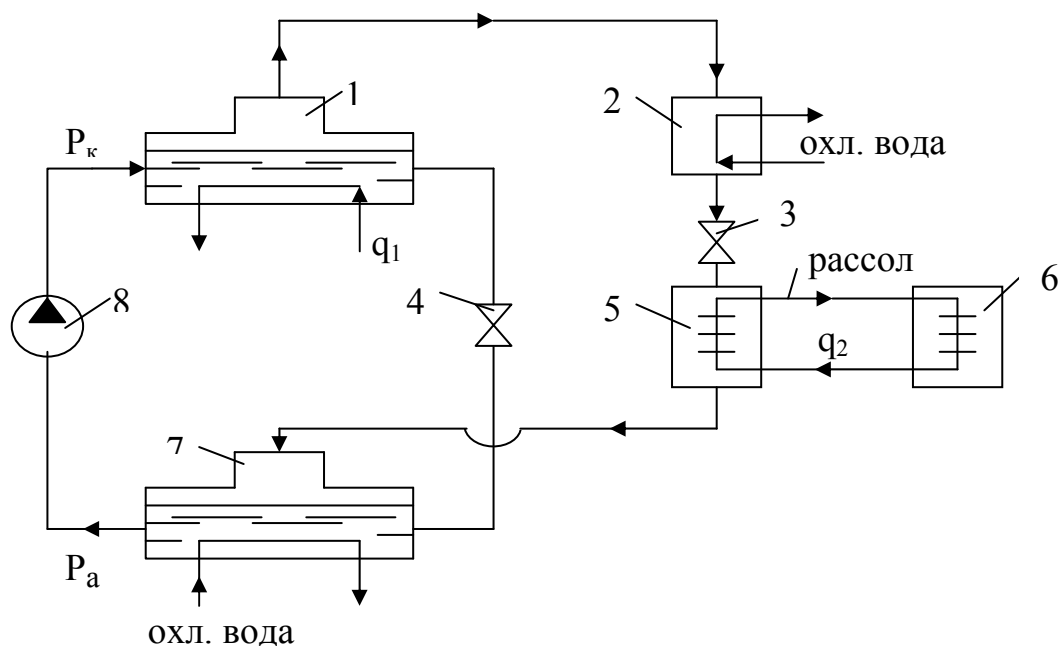


Рис. 6.4. Схема абсорбционной холодильной установки

Рабочим телом (холодильным агентом) такой установки является раствор двух полностью растворимых друг в друге веществ с резко различными температурами кипения, например водоаммиачный раствор. При $P=100$ кПа температура кипения чистой воды $99,84$ °С, а чистого аммиака $-33,4$ °С. Жидкость с низкой температурой кипения (аммиак) используется как холодильный агент, а жидкость с высокой температурой кипения (вода) — как абсорбент.

В парогенераторе 1 при постоянном давлении P_k происходит выпаривание из раствора аммиака за счет подводимой теплоты q_1 . Образуется влажный насыщенный пар, который направляется в конденсатор 2, где, отдавая охлаждающей воде теплоту парообразования, конденсируется при $P_k = \text{const}$. Образующийся конденсат проходит через дроссельный вентиль 3. При этом давление понижается до давления в абсорбере P_a , температура становится ниже температуры охлаждаемого объекта и образуется влажный насыщенный пар с малой степенью сухости. Этот пар поступает в испаритель, через который циркулирует рассол, отнимающий от охлаждаемого объекта теплоту q_2 , за счет теплоты q_2 агент подсушивается и в виде насыщенного пара с повышенной степенью сухости направляется в абсорбер 7, где поглощается раствором, а выделяющееся при этом тепло отводится охлаждающей водой. Чтобы не было изменения концентрации раствора в парогенераторе и абсорбере вследствие выпаривания агента в парогенераторе и поглощения его в абсорбере, часть обогащенного аммиаком раствора из абсорбера перекачивается насосом 8 в парогенератор, а из парогенератора часть обедненного раствора через дроссельный вентиль 4 направляется в абсорбер.

Полезным эффектом работы абсорбционной установки является теплота q_2 , воспринимаемая агентом в испарителе. Для получения этого эффекта в установке затрачивается теплота q_1 подводимая в парогенераторе. Степень эффективности абсорбционных установок характеризуется тепловым коэффициентом (холодильным коэффициентом) $\varepsilon = q_2/q_1 = 0,2 \div 0,8$. Несмотря на относительную простоту конструкции абсорбционных установок, их целесообразно применять в тех случаях, когда для работы парогенератора имеется возможность

использовать теплоносители низкого потенциала (например, отработавший водяной пар).

На рис. 6.5 представлена схема паровой компрессионной установки, состоящей из компрессора 1 с приводом 2, конденсатора 3, дроссельного вентиля 4 и испарителя 5.

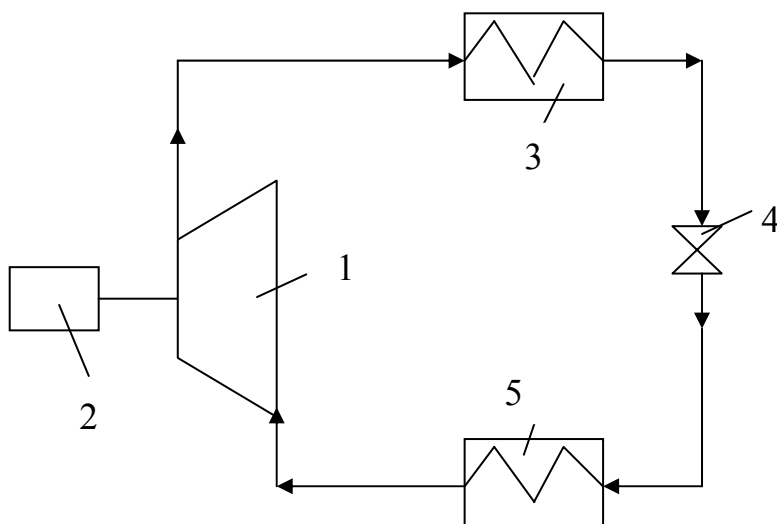


Рис. 6.5. Схема паровой компрессионной холодильной установки

На рис. 6.6 изображен цикл паровой компрессионной холодильной установки в T-S диаграмме. В компрессор 1 поступает хладагент в виде сухого насыщенного пара, его состоянию соответствует на T-S диаграмме точка 1. В компрессоре хладагент сжимается по адиабате 1-2. Сжатый горячий хладагент направляется в конденсатор 3, где по изобаре 2-3 охлаждается до сухого состояния, затем полностью конденсируется по изобарно-изотермическому процессу 3-4 и может переохладиться на несколько градусов по линии 4-5. После этого охлажденный агент в жидком виде проходит через дроссельный вентиль 4 и дросселируется по линии постоянной энтальпии 5-6. В точке 6 температура хладагента значительно ниже температуры окружающей среды. Холодный агент в виде влажного насыщенного пара проходит через испаритель 5, где за счет теплоты q_2 , отнимаемой от охлаждаемых тел, подсушивается по изобарно-изотермическому процессу 6-1. Затем хладагент поступает в компрессор и все процессы повторяются.

$$\text{Теплота} \quad q_2 = i_1 - i_6, \quad (6.3)$$

где i_6 — энтальпия хладагента на входе в испаритель, Дж/кг; i_1 — энтальпия хладагента на выходе из испарителя и на входе в компрессор, Дж/кг.

Работа, затрачиваемая на сжатие хладагента в компрессоре, равна $l=i_2 - i_1$, где i_2 — энтальпия хладагента на выходе из компрессора, Дж/кг.

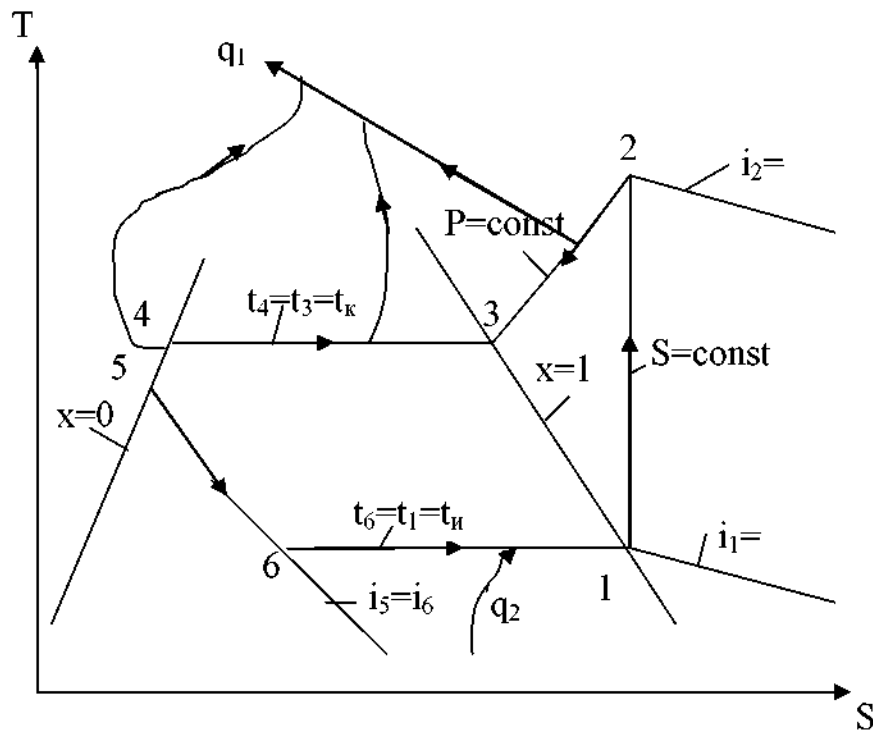


Рис. 6.6. Теоретический цикл паровой компрессионной холодильной установки

Тогда холодильный коэффициент идеальной паровой компрессионной установки будет равен

$$\varepsilon = \frac{q_2}{l} = \frac{i_1 - i_6}{i_2 - i_1}. \quad (6.4)$$

Описание опытной установки

Схема опытной холодильной установки представлена на рис. 6.7. Установка состоит из компрессора 1 с электроприводом 2, конденсатора радиаторного типа 3, дроссельного вентиля 4, испарителя радиаторного типа 5, вентиляторов 6 и 7 с электроприводом 8. Конденсатор 3 и испаритель 5 обдуваются воздухом, подаваемым вентиляторами 6 и 7. Мощность, потребляемую компрессором 1 и

вентиляторами 6 и 7, измеряем ваттметром. Скорость воздуха, охлажденного в испарителе 5, измеряем чашечным анемометром типа МС-13, а температуру медным термометром сопротивления, подключенным к автоматическому мосту типа КСМ 2, или ртутным термометром.

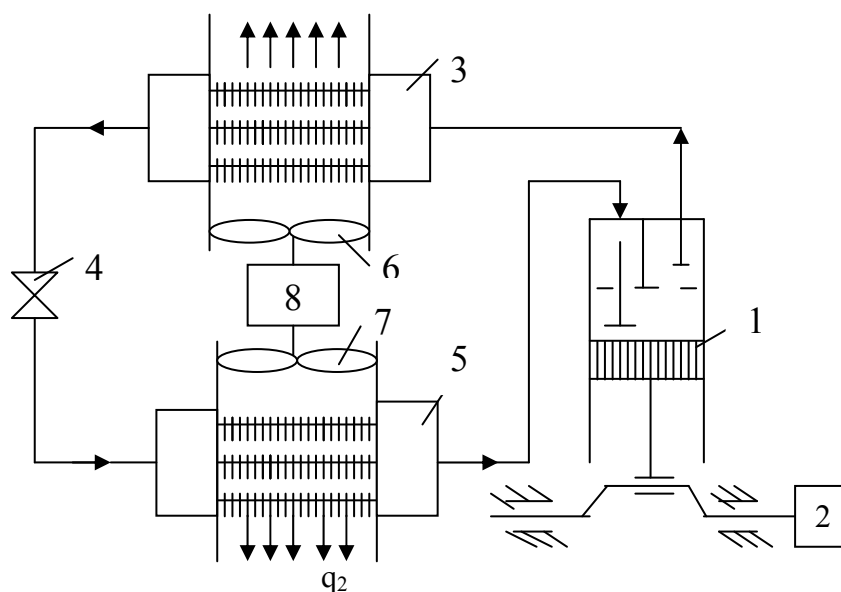


Рис. 6.7. Схема опытной холодильной установки

Проведение опыта

1. Установить пределы измерения на ваттметре «U»=300 В, «I»=10А.
2. Включить установку.
3. Через 10-15 мин. после включения установки произвести замер температуры воздуха на входе в испаритель и на выходе из него.
4. Выключить счетный механизм анемометра при помощи арретира и записать показание анемометра — I_1 дел. После этого одновременно включить секундомер и счетный механизм анемометра при помощи арретира. Через время $\tau = 100$ с. отключить счетный механизм анемометра и записать его конечное показание — I_2 дел. Через 1-2 мин. замер повторить.
5. Снять показание ваттметра — n дел.
6. Выключить установку.
7. Результаты измерений занести в табл. 6.1.

Таблица 6.1. – Результаты измерений

Замеры	Температура холодного воздуха t_x , °C	Температура окружающей среды t_o , °C	Показание ваттметра, n , дел	Показания анемометра,			Время замера τ , с
				I_1	I_2	$\Delta I = I_2 - I_1$	
1							
2							
Среднее							

Обработка результатов измерений

1. Находим мощность N_y (Вт), потребляемую установкой

$$N_y = \frac{I \cdot U \cdot n}{n_{ш}} \quad (6.5)$$

где $n_{ш}$ — число делений шкалы ваттметра.

2. Определяем среднюю скорость W (м/с) холодного воздуха в патрубке:

$$W = 0,5 + 1,025 \Delta I / \tau. \quad (6.6)$$

3. Вычисляем плотность ρ (кг/м³) холодного воздуха

$$\rho = \frac{P_0}{287 \cdot (273 + t_x)}, \quad (6.7)$$

где P_0 — давление атмосферного воздуха, Па.

4. Находим холодопроизводительность Q_x (Вт) установки:

$$Q_x = W \cdot F \cdot \rho \cdot c_p \cdot (t_o - t_x), \quad (6.8)$$

где F — площадь поперечного сечения патрубка;

$c_p = 1005$ Дж/(кг К) — изобарная массовая теплоёмкость воздуха.

Определяем холодильный коэффициент установки:

$$\varepsilon = Q_x / N_y. \quad (6.9)$$

Контрольные вопросы

1. Что называется холодильной установкой? Для чего она предназначена? Какие холодильные установки вы знаете?
2. Схема и цикл воздушной компрессионной холодильной установки.
3. Схема парожеторной холодильной установки.
4. Схема абсорбционной холодильной установки.
5. Схема и цикл паровой компрессионной холодильной установки.
6. Описание лабораторной установки и ход проведения опыта.

Лабораторная работа № 7.

«ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ»

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

Задание

1. Найти значение коэффициента теплопроводности исследуемого материала опытным путём.
2. Составить отчет по выполненной лабораторной работе.

Теоретическая часть

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

Передача теплоты теплопроводностью связана с наличием разности температур.

Совокупность значений температур во всех точках тела называют температурным полем. Температура в теле может изменяться в направлении одной, двух и трех координатных осей. В соответствии с этим температурное поле называется одно-, двух- и трехмерным. Если температурное поле меняется во времени, то оно называется неустановившимся или нестационарным $t=f(x,y,z,\tau)$, если же не меняется, то — установившимся или стационарным $t = f(x,y,z)$.

Поверхность, объединяющая точки равной температуры, называется изотермической. Температура в теле изменяется лишь в направлении, пересекающем изотермические поверхности.

Наибольшее изменение температуры будет наблюдаться в направлении нормали n к изотермическим поверхностям.

Предел отношения изменения температуры Δt на единицу расстояния по нормали Δn между изотермическими поверхностями называется температурным градиентом, т.е.

$$\lim_{\Delta n \rightarrow 0} \Delta t / \Delta n = \partial t / \partial n = \text{grad} \cdot t, \text{ К/м.} \quad (7.1)$$

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

Количество теплоты, переносимое через какую-либо изотермическую поверхность в единицу времени, называется тепловым потоком Q , Вт. Тепловой поток, отнесенный к единице площади изотермической поверхности, называется плотностью теплового потока или удельным тепловым потоком q , Вт/м²:

$$q = Q / F. \quad (7.2)$$

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

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

$$Q = -\lambda \cdot \frac{dt}{dn} F, \text{ Вт,} \quad (7.3)$$

где λ — 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 λ от t описывается формулой $\lambda = \lambda_0 [1 + b \cdot t]$, где λ_0 — значение коэффициента теплопроводности при температуре t_0 ; b — постоянная, определяемая опытным путем.

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

Для однородной цилиндрической стенки (трубы) длиной ℓ с внутренним диаметром d_1 и внешним диаметром d_2 уравнение (7.3) имеет вид:

$$Q = -\lambda \cdot \frac{dt}{dr} F = -\lambda \cdot \frac{dt}{dr} 2\pi \cdot r \cdot \ell, \quad (7.4)$$

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

r — радиус кольцевого слоя толщиной dr , м;

$F=2\pi r\ell$ — площадь боковой поверхности цилиндра радиусом r и длиной ℓ , м^2 .

При интегрировании уравнения (7.4) получаем следующую расчетную формулу:

$$Q = 2\pi \cdot \ell \cdot (t_{w1} - t_{w2}) / \ln(d_2/d_1), \text{ Вт}, \quad (7.5)$$

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

Описание опытной установки

Эксперимент по определению λ проводится методом «цилиндра» на установке, принципиальная схема которой дана на рис. 7.1.

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

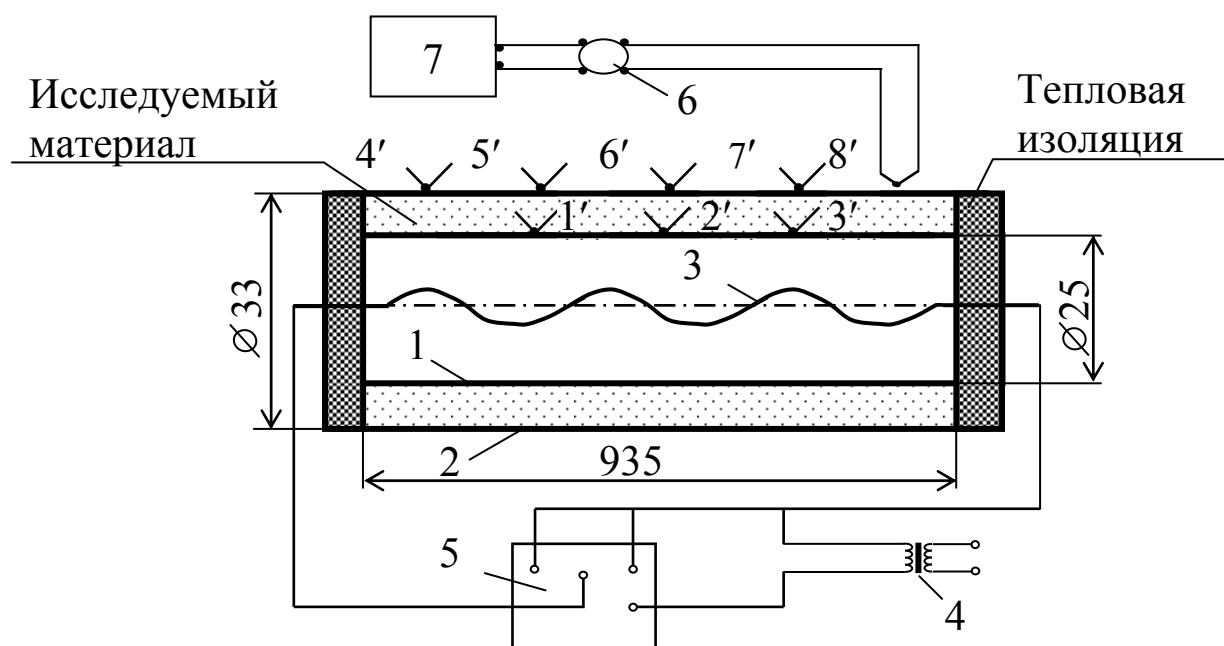


Рис. 7.1. Принципиальная схема экспериментальной установки:
 1 — внутренняя латунная труба; 2 — наружная латунная труба;
 3 — электрический нагреватель; 4 — ЛАТР; 5 — ваттметр;
 6 — переключатель термопар; 7 — потенциометр; 1'-8' — спай хромель-копелевых термопар

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

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

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

Проведение опыта

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

Таблица 7.1 – Протокол испытаний

Мощность электронагревателя $Q=$ Вт; $t_0=$ °C; $E_0=$ mV								
Номера термопар	1'	2'	3'	4'	5'	6'	7'	8'
ЭДС термопар E_i :								
1 замер								
2 замер								
Среднее значение $E_{i\text{cp}}$, mV								
$E=E_0+E_{i\text{cp}}$, 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 стационарного режима выполнить 2 замера показаний термопар с интервалом между замерами 1-2 мин. Выключение установки производится преподавателем или лаборантом.

Обработка результатов опыта

Перевод E_i в градусы следует выполнить следующим образом: по градуировочной таблице 7.2 находим значение ЭДС E_0 , соответствующее температуре окружающей среды t_0 . Величину E_0 складываем с ЭДС, измеренной потенциометром E_i , т.е. находим $E=E_i+E_0$. После этого по величине E по градуировочной таблице 2 находим измеряемую температуру t .

Таблица 7.2 – 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

Коэффициент теплопроводности исследуемого материала находится из формулы (7.5):

$$\lambda = [Q \cdot \ln(d_2/d_1)] / [2\pi \cdot \ell \cdot (t_{w1} - t_{w2})], \quad (7.6)$$

где λ — коэффициент теплопроводности исследуемого материала, Вт/(м·К);

Q — мощность электрического нагревателя, Вт;

ℓ — 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.

$$t_{w1} = (t_1 + t_2 + t_3) / 3, \quad (7.7)$$

$$t_{w2} = (t_5 + t_6 + t_7) / 3. \quad (7.8)$$

Полученное значение λ следует отнести к средней температуре исследуемого материала

$$t = 0,5 \cdot (t_{w1} + t_{w2}). \quad (7.9)$$

Контрольные вопросы

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

Лабораторная работа №8.

«ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛООТДАЧИ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ТРУБЫ ПРИ СВОБОДНОЙ КОНВЕКЦИИ ВОЗДУХА»

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

Задание

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

Теоретическая часть

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

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

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

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

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

$$Q_k = \alpha_k \cdot F \cdot (t_w - t_f), \quad (8.1)$$

где Q_k — тепловой поток, отдаваемый конвекцией, Вт;

F — поверхность трубки, m^2 ;

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

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

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

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):

$$Nu = \alpha_k \cdot \ell / \lambda_f, \quad (8.2)$$

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:

$$Pr = (\nu \cdot \rho \cdot c_p) / \lambda = \nu / a, \quad (8.3)$$

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:

$$\text{Gr} = (g \cdot \beta \cdot \ell^3 \cdot \Delta t) / \nu^2, \quad (8.4)$$

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):

$$\text{Re} = w \cdot \ell / \nu, \quad (8.5)$$

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:

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

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

$$\text{Nu} = C \cdot (\text{Gr} \cdot \text{Pr})^n, \quad (8.6)$$

где C и n — постоянные опытные величины.

Описание опытной установки

Опытная установка (рис. 8.1) представляет собой горизонтальную медную трубу диаметром $d=0,025$ м и длиной $\ell=0,935$ метра.

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

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

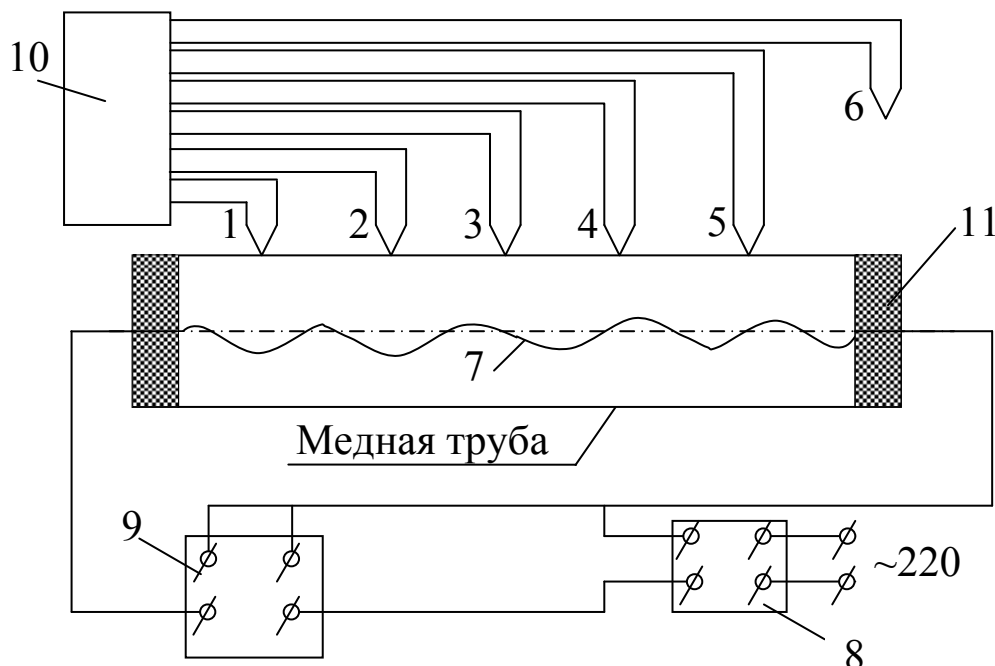


Рис. 8.1. Опытная установка

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

Проведение опыта

Установку включает и выключает преподаватель. Тепловой режим трубы регулируется при помощи автотрансформатора 8. Установив мощность нагревателя (40-60 Вт), необходимо следить за тем, чтобы она оставалась неизменной в течение всего опыта. Установка прогревается примерно 50-60 минут. После того как наступит стационарное состояние, записывают показания всех термопар 1-6 в таблицу 8.1. Производят три записи показаний термопар, делая интервал между записями 1-2 мин.

Таблица 8.1 – 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 $t_w, ^\circ\text{C}$:

$$t_w = (t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5) / 5, \quad (8.7)$$

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

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

$$F = \pi \cdot d \cdot \ell, \quad (8.8)$$

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_l и конвективным Q_k , т.е. общий тепловой поток состоит из двух потоков:

$$Q = Q_l + Q_k. \quad (8.9)$$

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

$$Q_l = \varepsilon \cdot C_o \cdot F \cdot \{[(273 + t_w) / 100]^4 - [(273 + t_f) / 100]^4\}, \quad (8.10)$$

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

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

$$Q_k = Q - Q_{\text{л}}. \quad (8.11)$$

1.5. Вычисляется коэффициент теплоотдачи α_k , Вт/(м²·К) из уравнения Ньютона-Рихмана (8.1):

$$\alpha_k = Q_k / [F(t_w - t_f)]. \quad (8.12)$$

2. Определение теоретического значения α_k

2.1. Критерий Gr_f определяется по уравнению (8.4):

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

где $g = 9,81$ — ускорение свободного падения, м/с²;

d — внешний диаметр трубы, м;

t_w — температура поверхности трубы, °С;

t_f — температура воздуха вдали от трубки, °С;

ν_f — коэффициент кинематической вязкости воздуха при температуре t_f , м²/с;

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

2.2. Вычисляется значение критерия Nu_f по формуле (8.6):

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

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

Значения коэффициента теплопроводности λ_f , коэффициента кинематической вязкости ν_f , и критерия Прандтля Pr_f находим из таблицы 8.2 по температуре t_f .

2.3. Из формулы (8.2) для критерия Нуссельта Nu_f находится коэффициент теплоотдачи конвекцией:

$$\alpha_k = Nu_f \cdot \lambda_f / d. \quad (8.13)$$

После этого сравниваются значения α_k , полученные опытным и теоретическим путем.

Таблица 8.2 – Физические параметры сухого воздуха при давлении 101325 Па (см. приложение Б)

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

Контрольные вопросы

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

Лабораторная работа № 9.

«ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ИЗЛУЧЕНИЯ И СТЕПЕНИ ЧЕРНОТЫ ТВЕРДОГО ТЕЛА»

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

Задание

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

Теоретическая часть

Теплообмен излучением — это процесс передачи теплоты от одного тела к другому в виде электромагнитных волн. Он

представляет собой превращение внутренней энергии тела в энергию электромагнитных волн (или фотонов) с последующим превращением последней во внутреннюю энергию других тел.

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

Поверхностная плотность потока собственного излучения тела, Вт/м², имеющего абсолютную температуру T , К определяется по закону Стефана Больцмана:

$$E = \varepsilon \cdot C_0 (T/100)^4 = C (T/100)^4, \quad (9.1)$$

где ε — степень черноты или интегральный коэффициент теплового излучения — отношение плотностей потока излучения E реального тела и абсолютно черного тела E_0 или отношение коэффициентов лучеиспускания реального тела C и абсолютно черного тела $C_0 = 5,67$ Вт/(м²·К⁴). Тогда для реального тела

$$C = \varepsilon \cdot C_0. \quad (9.2)$$

Значение C изменяется от 0 до 5,67, а ε — от 0 до 1.

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

$$Q_{1-2} = \varepsilon_{np} \cdot c_0 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] F, \text{ Вт}, \quad (9.3)$$

где ε_{np} — приведенный коэффициент степени черноты системы двух тел; F — площадь поверхности тела с температурой T_1 , м².

Приведенный коэффициент степени черноты ε_{np} системы двух тел определяется по формулам:

1) два тела с параллельными поверхностями больших размеров

$$\varepsilon_{np} = \left[\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right]^{-1}; \quad (9.4)$$

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

$$\varepsilon_{np} = \left[\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{F_1}{F_2} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right) \right]^{-1}. \quad (9.5)$$

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

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

$$\varepsilon_{np} = \left[\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} + 2 \sum_{i=1}^n \frac{1}{\varepsilon_{\partial i}} - 1 \right]^{-1} \quad (9.6)$$

где $\varepsilon_{\partial i}$ — степень черноты i -го экрана.

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

$$Q_{л.к} = Q_l + Q_k = \varepsilon_{np} \cdot c_o \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] F_1 + \alpha_k \cdot (T_1 - T_2) F_1 \quad (9.7)$$

Описание опытной установки

Опытная установка (рис. 9.1) представляет собой горизонтальную медную трубу диаметром $d=0,025$ м и длиной $l=0,935$ м. Для измерения температуры поверхности трубы в её стенке по длине заложены пять хромель-копелевых термопар 1-5. Температура воздуха вдали от трубки измеряется термопарой 6. Внутри медной трубы имеется электрический нагреватель 7. Мощность, потребляемая нагревателем, регулируется лабораторным автотрансформатором (ЛАТРОм) 8 и измеряется ваттметром 9. Термопары 1-6 подключены к потенциометру 10. По шкале потенциометра производится отсчет температур в °С. Торцы медной трубы защищены тепловой изоляцией 11.

Проведение опыта

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

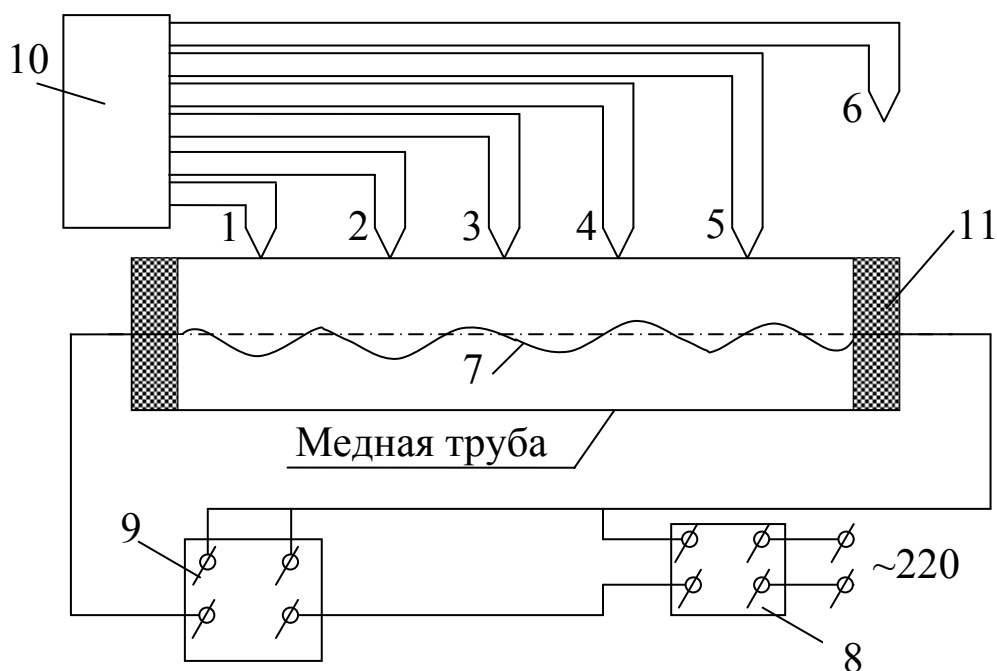


Рис. 9.1. Принципиальная схема лабораторной установки:
 1-6 — термопары; 7— электрический нагреватель; 8 — ЛАТР;
 9 — ваттметр; 10 — потенциометр; 11— тепловая изоляция.

Производят три записи показаний термопар. Интервал между записями 1-2 минуты. После замеров установка выключается либо преподавателем, либо лаборантом. Результаты замеров заносят в протокол испытаний (таблицу 9.1).

Таблица 9.1 – Протокол испытаний

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

Основные расчетные формулы опыта

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

$$Q = Q_{\text{л}} + Q_{\text{к}}. \quad (9.8)$$

Искомые в данной работе величины коэффициента излучения C и степени черноты ε следует определять из формулы лучистого теплового потока:

$$Q_{\text{л}} = \varepsilon \cdot C_0 \left[\left(\frac{T_w}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_f}{100} \right)^4 \right] \cdot F \quad (9.9)$$

где $C = \varepsilon \cdot C_0$ — коэффициент излучения, Вт/(м² К⁴); ε — степень черноты поверхности трубы; $C_0 = 5,67$ Вт/(м² К⁴) — коэффициент лучеиспускания абсолютно черного тела; F — поверхность теплообмена, м; T_w — температура поверхности трубки, К, $T_w = 273 + t_w$; T_f — температура воздуха, К, $T_f = 273 + t_f$.

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

$$Q_{\text{к}} = \alpha \cdot (t_w - t_f) \cdot F, \quad (9.10)$$

где α — коэффициент теплоотдачи, Вт/(м² К), определяемый из критериального уравнения для условий свободной конвекции горизонтальной трубы:

$$Nu_f = 0,5 (Gr_f \cdot Pr_f)^{0,25}, \quad (9.11)$$

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

То лучистая составляющая определяется из уравнения (9.8):

$$Q_{\text{л}} = Q - Q_{\text{к}}, \quad (9.12)$$

и тогда из уравнения (9.9) можно будет определить искомые C и ε .

Расчет вести в следующей последовательности:

1. Находится средняя температура поверхности трубки как среднее арифметическое:

$$t_w = (t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5) / 5, \text{ } ^\circ\text{C} \quad (9.13)$$

2. Определяется площадь поверхности трубки:

$$F = \pi \cdot d \cdot l, \text{ м}^2, \quad (9.14)$$

где d — внешний диаметр трубы, м; l — длина трубы, м.

3. Выбираются теплофизические свойства воздуха по температуре воздуха t_f из соответствующей таблицы 9.2:

λ_f — коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);

ν_f — коэффициент кинематической вязкости, м²/с;

Pr_f — критерий Прандтля.

Таблица 9.2 – Теплофизические свойства воздуха (см. прилож. Б)

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

4. Определяется критерий Грасгофа:

$$Gr_f = \frac{g \cdot d^3}{\nu_f^2} \cdot \beta_f \cdot \Delta t \quad (9.15)$$

где g — ускорение силы тяжести $g = 9,81 \text{ м}/\text{с}^2$; Δt — разность температур, $\Delta t = t_w - t_f$; β_f — коэффициент термического расширения воздуха, 1/К, определяемый по формуле:

$$\beta_f = 1/(273 + t_f). \quad (9.16)$$

5. Находится критерий Нуссельта из уравнения (9.11):

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

6. Рассчитывается коэффициент теплоотдачи по формуле:

$$\alpha = \frac{Nu_f \cdot \lambda_f}{d}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}) \quad (9.17)$$

7. Определяется конвективный тепловой поток из уравнения Ньютона-Рихмана (9.10):

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

8. Определяется тепловой поток лучеиспусканием из (9.8):

$$Q_{\text{л}} = Q - Q_k, \text{ Вт} \quad (9.18)$$

9. Из уравнения (9.9) находится степень черноты поверхности трубки:

$$\varepsilon = \frac{Q_l}{c_o \left[\left(\frac{T_w}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_f}{100} \right)^4 \right] \cdot F} \quad (9.19)$$

10. Рассчитывается коэффициент лучеиспускания окисленной поверхности медной трубки:

$$C = \varepsilon \cdot C_o, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К}^4). \quad (9.20)$$

11. Необходимо сравнить опытные значения степени черноты ε с табличными данными для медной окисленной поверхности (см. приложение В).

Контрольные вопросы

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мирам, Андрей Олегович. Техническая термодинамика. Тепломассообмен [Текст] : учебник для студентов, обучающихся по направлению 270100 "Строительство" / А. О. Мирам, В. А. Павленко. - Москва : АСВ, 2017. - 352 с.
2. Теплотехника: [Текст]: учебник / под ред. А. П. Баскакова. - 3-е изд., перераб. и доп. - М.: БАСТЕТ, 2010. - 328 с.
3. Оболенский, Н. В. Практикум по теплотехнике [Электронный ресурс] : учебное пособие / Н. В. Оболенский ; В. Л. Осокин. - Княгинино : НГИЭИ, 2010. - 236 с. - Режим доступа : biblioclub.ru
4. Дерюгин, Виктор Владимирович. Тепломассообмен : учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлениям подготовки бакалавриата "Строительство" и "Теплоэнергетика и теплотехника" / В. В. Дерюгин, В. Ф. Васильев, В. М. Уляшева. - Изд. 3-е, стер. - Санкт-Петербург : Лань, 2020. - 240 с. - Текст : непосредственный.
5. Техническая термодинамика и теплотехника: [Текст]: учебное пособие / под ред. А. А. Захаровой. - 2-е изд., испр. - М.: Академия, 2008. - 272 с.
6. Теплотехнические измерения и приборы / Г.И.Иванова, Н.Д.Кузнецов, В.С.Чистяков. – М.: МЭИ, 2005. 450с.
7. Ерофеев В.А., Семёнов П.Д., Пряхин А.С. Теплотехника/Под ред. В.П.Ерофеева.-М.:Академкнига, 2006. 456 с.
8. Теплотехника [Текст]: учебник / Под ред. В. Н. Луканина. - 4-е изд., испр. - М.: Высшая школа, 2003. - 671 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А

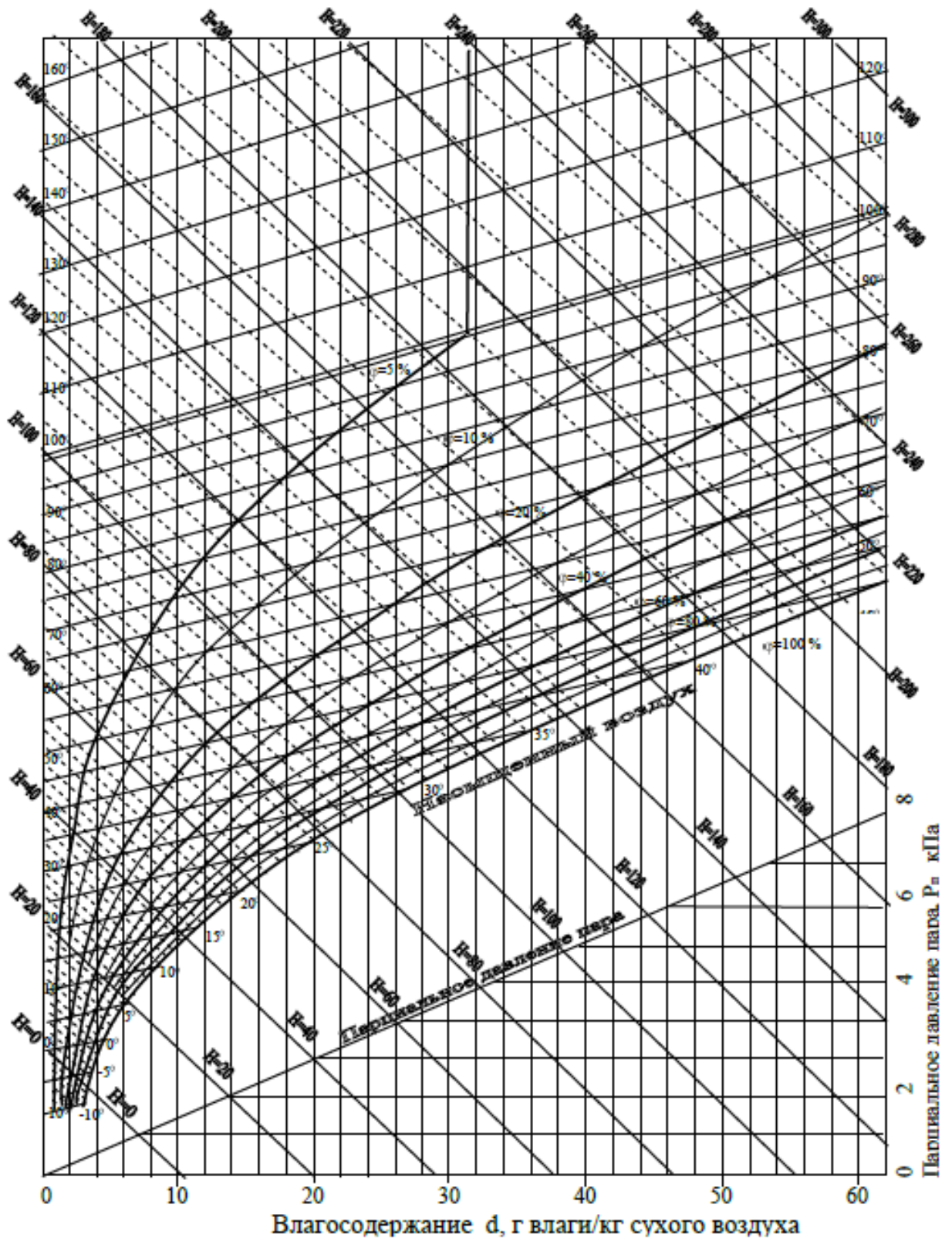
Рис. П.1. h-d диаграмма влажного воздуха при $P = 745$ мм рт.ст.

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

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

Таблица П.3 – Степень черноты различных металлов

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