

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА  
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Учреждение образования  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
АГРАРНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

## ТЕПЛОТЕХНИКА

*Рекомендовано Учебно-методическим объединением по аграрному  
техническому образованию в качестве учебно-методического  
пособия для студентов учреждений высшего образования группы  
специальностей 74 06 Агроинженерия и специальности  
1-36 12 01 Проектирование и производство сельскохозяйственной  
техники*

Минск  
БГАТУ  
2016

УДК 621.1.016(07)  
ББК 31.3я7  
Т34

Авторы:

кандидат технических наук, доцент *В. А. Коротинский*,  
кандидат технических наук, доцент *А. Г. Цубанов*,  
кандидат физико-математических наук *В. А. Занкевич*,  
старший преподаватель *С. И. Сеница*

Рецензенты:

кафедра энергосбережения и возобновляемых источников энергии  
Белорусского национального технического университета (заведующий  
кафедрой доктор физико-математических наук *В. Г. Баитовой*);  
директор ПМНУП «Спецтехналадка» *А. В. Михадюк*

**Теплотехника** : учебно-методическое пособие / В. А. Коротинский, А. Г. Цубанов, В. А. Занкевич, С. И. Сеница. – Минск : БГАТУ, 2016. – 96 с.  
ISBN 978-985-519-804-9.

Содержит основные теоретические положения, а также общие сведения о лабораторных методах теплотехнических измерений и экспериментальных исследованиях процессов теплотехники, необходимые для выполнения лабораторных работ.

Для студентов группы специальностей 74 06 Агроинженерия, специальности 1-36 12 01 Проектирование и производство сельскохозяйственной техники.

УДК 621.1.016(07)  
ББК 31.3я7

ISBN 978-985-519-804-9

© БГАТУ, 2016

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	5
Лабораторная работа № 1	
ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ.....	6
1.1. Цель работы .....	6
1.2. Основные сведения .....	6
1.3. Методика выполнения работы .....	23
Контрольные вопросы .....	23
Лабораторная работа № 2	
ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ .....	24
2.1. Цель работы .....	24
2.2. Основные сведения .....	24
2.3. Методика выполнения работы .....	32
Контрольные вопросы .....	33
Лабораторная работа № 3	
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВЛАЖНОГО ВОЗДУХА....	34
3.1. Цель работы .....	34
3.2. Основные сведения .....	34
3.3. Гигрометрический метод .....	36
3.4. Психрометрический метод .....	38
3.5. Метод измерения по точке росы .....	43
3.6. Методика выполнения работы .....	46
Контрольные вопросы .....	47
Лабораторная работа № 4	
ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВЛАЖНОГО НАСЫЩЕННОГО ПАРА .....	48
4.1. Цель работы .....	48
4.2. Основные сведения .....	48
4.3. Методика выполнения работы .....	52
Контрольные вопросы .....	56
Лабораторная работа № 5	
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННОГО МАТЕРИАЛА .....	57
5.1. Цель работы .....	57
5.2. Основные сведения .....	57
5.3. Методика выполнения работы .....	64
Контрольные вопросы .....	67

Лабораторная работа № 6	
ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООТДАЧИ ПРИ СВОБОДНОМ И ВЫНУЖДЕННОМ ДВИЖЕНИЯХ ВОЗДУХА .....	68
6.1. Цель работы .....	68
6.2. Основные сведения .....	68
6.3. Методика выполнения работы при свободном движении воздуха .....	75
6.4. Научно-исследовательская часть работы .....	79
6.5. Методика выполнения работы при вынужденном движении воздуха .....	80
6.6. Определение коэффициента теплоотдачи по критериальным уравнениям .....	80
Контрольные вопросы .....	82
Лабораторная работа № 7	
ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ В ТЕПЛООБМЕННОМ АППАРАТЕ .....	83
7.1. Цель работы .....	83
7.2. Основные сведения .....	83
7.3. Методика выполнения работы .....	87
Контрольные вопросы .....	91
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	92
Приложение 1	
Термодинамические свойства воды и водяного пара в состоянии насыщения .....	93
Приложение 2	
Теплофизические свойства материалов .....	94
Приложение 3	
Теплофизические свойства воздуха при атмосферном давлении $B = 101$ кПа .....	94
Приложение 4	
Ориентировочные значения коэффициентов теплоотдачи ....	95
Приложение 5	
Ориентировочные значения коэффициента теплопередачи ....	95

## ВВЕДЕНИЕ

Современные энерготехнологические системы требуют от специалиста глубокого понимания законов и принципов действия теплового оборудования, встроенного в них. Только достаточно высокий уровень общей теплотехнической подготовки позволит специалисту решать задачи по созданию современных экономически выгодных тепловых установок и находить пути повышения их энергетической эффективности.

Цель учебно-методического пособия – обеспечить студентов минимальными теоретическими и справочными материалами, необходимыми для самостоятельной подготовки к проведению лабораторных работ, их качественного выполнения, оформления отчета и последующей защиты.

В учебно-методическом пособии рассмотрены следующие основные разделы: теплотехнические приборы и измерения, техническая термодинамика, тепло- и массообмен. По каждой лабораторной работе представлены цель, методические указания к выполнению, схема и описание экспериментальной установки, порядок проведения опытов и обработки полученных данных, контрольные вопросы.

Лабораторные исследования позволяют более глубоко понимать основные законы термодинамики и теплопередачи, принципы работы тепловых установок. Обработка опытных данных может осуществляться с помощью диаграмм и справочных таблиц, умение пользоваться которыми необходимо инженеру.

## Лабораторная работа № 1

### ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

#### 1.1. Цель работы

Усвоение основ теории и методов измерения температуры, изучение устройства и принципа действия термометров, области применения и правил их установки.

#### 1.2. Основные сведения

Температура – это физическая величина, характеризующая состояние термодинамического равновесия макроскопической системы. Температура характеризует степень нагретости тела и является мерой средней кинетической энергии движения его молекул.

В технической термодинамике в качестве параметра состояния рабочего тела (газа, газовой смеси, влажного воздуха, пара) используется термодинамическая (абсолютная) температура, единицей измерения которой является Кельвин (К). Она названа в честь английского физика В. Томсона (лорд Кельвин) (1824-1907 гг.).

Абсолютная температура всегда положительна, а при температуре  $T = 0$  К прекращается тепловое движение молекул и абсолютный нуль недостижим.

Термодинамическая температура относится к интенсивным параметрам, которые не зависят от массы рабочего тела.

В настоящее время используется две температурные шкалы: Международная термодинамическая температурная шкала (МТТШ) и Международная практическая температурная шкала Цельсия (МПТШ-68).

Между температурами, выраженными в градусах Цельсия и Кельвина, существует связь:

$$T = t + 273,15. \quad (1.1)$$

При построении международной термодинамической температурной шкалы МТТШ используется единственная реперная точка – температура тройной точки химически чистой воды  $T = 273,16$  К.

Согласно (1.1) градус Кельвина (МТТШ) численно равен градусу Цельсия (МПТШ-68), что означает  $dT = dt$ .

МПТШ-68 основана на ряде воспроизводимых равновесных состояний – 11 основных реперных точек, которым приписаны определенные значения температур. В качестве реперных точек использованы температура таяния льда ( $t_0 = 0$  °С) при давлении 101,32 кПа (760 мм рт.ст.), температура кипения воды при таком же давлении ( $t_0 = 100$  °С), а также тройные точки водорода, кислорода, аргона, точки кипения водорода, кислорода, точки затвердения цинка, серебра и золота и др.

### Методы измерения температуры

Методы измерения температуры подразделяются на контактные, в которых чувствительный элемент прибора (датчика) контактирует с телом или средой, температура которых измеряется, и бесконтактные, основанные на измерении характеристик теплового излучения без непосредственного контакта с измеряемым объектом.

Существующие методы измерения температуры основаны на использовании однозначной зависимости между температурой (входная величина  $x = t$  °С) и другой физической величиной (выходная величина  $y$ ), измеряемой непосредственно и называемой термометрическим свойством (выходной параметр). Эта физическая величина должна удовлетворять следующим требованиям: однозначность связи с температурой, независимость от других факторов, воспроизводимость результатов, изменение величины в таких пределах, в которых измерение можно выполнить с достаточно высокой точностью.

К термометрам с неэлектрическими выходными величинами относятся: а) жидкостные термометры  $V_t = V_0(1 + \alpha_t t)$ , где  $V_t$ ,  $V_0$  – объемы (выходные параметры) при температуре  $t$  °С и 0 °С. В газовых термометрах  $\alpha_t = \frac{1}{V_0} \frac{dV}{dt}$  (коэффициент объемного расширения)

ния)  $\alpha_t = \frac{1}{273,15}$  К<sup>-1</sup>; б) термометры линейного расширения (дилатометрические и биметаллические термометры); в) манометрические термометры  $p = f(t)$ , где  $p$  – давление газа, жидкости в термобаллоне.

К термометрам с электрическими выходными величинами относятся: термометры электросопротивления некоторых металлов и полупроводников; термоэлектрические преобразователи; датчики температуры с использованием пироэлектрических материалов.

Контактные методы и средства применяются для измерения температур в диапазоне от значений, близких к абсолютному нулю, до 1800 °С. Используя термопреобразователи из тугоплавких материалов и квазиконтактный метод измерения, при котором термопреобразователь помещается в измеряемую среду на короткое время, можно повысить верхний предел измерений до 2500-3000 °С.

Терморезистивные и термоэлектрические преобразователи позволяют измерять температуру практически во всем указанном диапазоне. Кроме того, некоторые виды таких преобразователей имеют нормируемые государственными стандартами технические и эксплуатационные характеристики, что обусловило их широкое применение.

В зависимости от используемого термометрического свойства приборы для измерения температур подразделяются на следующие основные типы: термометры расширения, термометры манометрические, термометры сопротивления, термоэлектрические термометры (термопары), пирометры. Их характеристика приведена в таблице 1.1.

Таблица 1.1

Характеристики термометров			
Наименование термометров	Термометрическое свойство	Пределы измерения, °С	
		нижний	верхний
1	2	3	4
Жидкостные термометры	Объем жидкостей	-200	600
Манометрические термометры	Давление газов и паров	-200	600

Окончание таблицы 1.1

1	2	3	4
Термометры сопротивления	Электрическое сопротивление	-260	500
Термоэлектрические термометры	Термоэлектродвижущая сила	-50	2500
Оптические термометры	Характеристики теплового	700	6000
Радиационные пирометры	Характеристики теплового	20	3000

### Термометры расширения

В термометрах расширения измеряется линейный размер термометрического вещества или его объем. В зависимости от вида рабочего элемента и особенностей устройства различают термометры расширения трех видов: жидкостные, биметаллические и дилатометрические.

Жидкостные термометры состоят из резервуара, заполненного жидкостью, и капиллярной трубки. С увеличением температуры объем жидкости возрастает, и часть его вытесняется из резервуара в капиллярную трубку. С понижением температуры происходит обратный процесс. В зависимости от положения мениска жидкости относительно шкалы термометра судят о значении температуры.

Термометрическими веществами могут служить ртуть, спирт, керосин, эфир и т.д. Наибольшее распространение получили спиртовые термометры.

В производственных и лабораторных условиях обычно применяются термометры с вложенной шкалой. Они могут быть электроконтактными с впаянными в капилляр контактами для замыкания электрической цепи столбиком ртути.

Биметаллические и дилатометрические термометры основаны на свойстве твердого тела изменять свои линейные размеры при изменении температуры. Такие термометры не получили распространения как самостоятельные приборы, а используются в качестве чувствительного элемента (датчиков) в системах автоматического регулирования температуры.

Биметаллические термометры (рис. 1.1, б) содержат основной чувствительный элемент – биметаллическую пластину 1, которая состоит из двух разнородных металлов, имеющих различные коэффициенты линейного расширения, например, латунь – инвар, сталь – инвар.

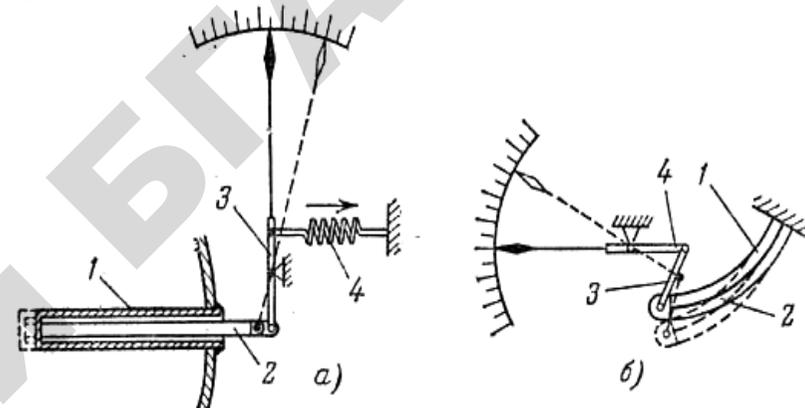


Рис. 1.1. Термометры расширения:  
а – дилатометрический; б – биметаллический

С изменением температуры изменяется кривизна пластины, которая с помощью тяги 3 воздействует на стрелку. Биметаллические элементы используют в температурных реле в диапазоне температур от «минус» 60 до 300 °С.

Дилатометрический термометр (рис. 1.1, а) имеет закрытую с одного конца трубку 1, помещаемую в измеряемую среду и изготовленную из материала с большим коэффициентом термического расширения. В трубку вставлен стержень 2, прижимаемый к ее дну рычагом 3, скрепленным с пружиной 4. Стержень изготовлен из материала с малым коэффициентом расширения. При изменении температуры трубка изменяет свою длину, что приводит к перемещению в ней стержня, сохраняющего почти постоянные размеры и связанного посредством рычага 3 с указательной стрелкой прибора.

Различные удлинения стержня и трубки при изменении температуры обуславливают поворот стрелки, что позволяет регистрировать температуру. Дилатометрические термометры используются в двухпозиционных терморегулирующих устройствах и применяются

в интервале температур от «минус» 30 до 1000 °С. Трубку изготавливают из металла (латуни), стержень может быть стеклянным, фарфоровым или металлическим из инвара.

### Манометрические термометры

В этих термометрах используется свойство вещества, находящегося в замкнутом герметичном объеме, изменять давление под влиянием температуры. Схема манометрического термометра дана на рис. 1.2.

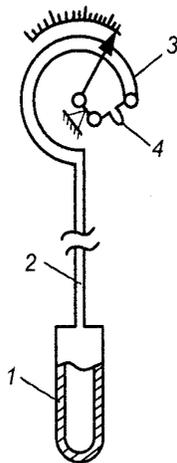


Рис. 1.2. Схема манометрического термометра

Термосистема состоит из термобаллона 1, капилляра 2 и упругого элемента 3. В зависимости от рода рабочего вещества в термосистеме применяют термометры газовые, жидкостные и конденсационные (парожидкостные). Соответственно используют ртуть, метиловый спирт, азот, ацетон, бензол, воск, церезин и др. Термобаллон помещается в среду, температура которой измеряется. Давление в термосистеме под влиянием температуры изменяется, за счет чего деформируется упругий элемент, а показывающая часть 4 позволяет зафиксировать температуру.

Существенными преимуществами манометрических термометров являются возможность установки прибора на расстоянии от места измерения (длина капилляра составляет от 1 до 60 м), автоматиче-

ская запись показаний и достаточная механическая прочность. Однако таким термометрам присущи недостатки: невысокая точность измерения, большая инерционность и трудность ремонта при нарушении герметичности термосистемы.

Наибольшее распространение получили газовые манометрические термометры, в которых рабочим веществом является азот.

### Термометры электросопротивления. Терморезисторы

Принцип действия термометров сопротивления основан на свойстве вещества изменять электрическое сопротивление под влиянием температуры. В качестве материалов для термометров сопротивления используют металлы и полупроводники.

Материалы для термометров сопротивления должны обладать большим удельным электрическим сопротивлением, высоким температурным коэффициентом электрического сопротивления, устойчивостью при нагревании, стойкостью против коррозии и воспроизводимостью состава металла при отдельных его плавках.

Наиболее пригодными для изготовления термометров сопротивления оказались платина и медь. Соответственно выпускаются платиновые термометры сопротивления типа ТСП и медные типа ТСМ.

Термометры сопротивления изготавливают обычно в виде обмотки из тонкой проволоки на специальном каркасе из электроизоляционного материала – слюды. Для защиты обмотки от механических повреждений предусмотрен металлический защитный чехол.

В качестве полупроводниковых термометров сопротивления (термисторы) используют германий и смеси различных полупроводниковых веществ: оксидов меди и марганца, двуокиси титана и т.д.

К числу достоинств термометров сопротивления из чистых металлов следует отнести: высокую точность, малую инерционность, возможность централизации контроля температуры и использования в системах автоматического регулирования.

Применение термометров сопротивления связано со следующими недостатками: сложность вторичных измерительных приборов, высокая стоимость используемых материалов (платина, германий) и влияние среды на свойства (при окислении).

В качестве устройств, измеряющих электрическое сопротивление термометров в функции температуры, применяют мосты

и логометры. Мосты бывают уравновешенные и неуравновешенные, автоматические и неавтоматические.

Принципиальная схема уравновешенного моста показана на рис. 1.3. Здесь  $R_1$  и  $R_3$  – постоянные сопротивления,  $R_2$  – переменное сопротивление (реохорд), с помощью которого мост приводят в равновесное состояние,  $R_T$  – сопротивление термометра, НП – нуль-прибор.

При равновесии мостовой схемы ток  $I_0$  в измерительной диагонали равен нулю, а падения напряжений на сопротивлениях  $R_1$  и  $R_3$  должны быть равны между собой.

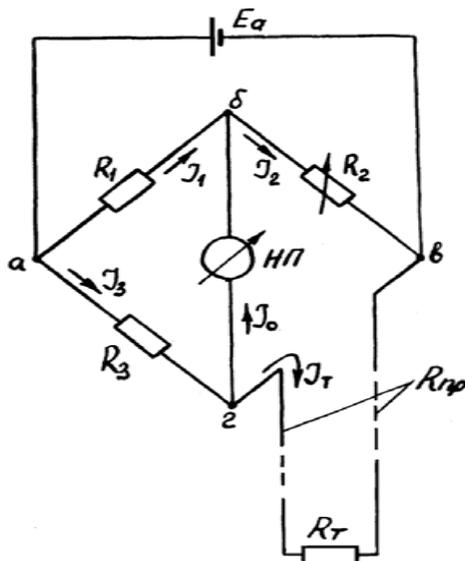


Рис. 1.3. Принципиальная схема уравновешенного моста

Кроме того, падения напряжений на плечах « $\delta b$ » и « $\delta z$ » также должны быть равными между собой.

Условием равновесия моста является равенство произведений сопротивлений противоположных плеч  $R_1 R_3 = R_2 R_T$ .

Каждому значению  $R_T$  при равновесном состоянии мостовой схемы соответствует определенное значение  $R_2$ . Шкалу реохорда  $R_2$  градуируют в  $^{\circ}\text{C}$ , что позволяет по положению движка определить температуру нагрева термометра.

## Термоэлектрические термометры (термопары)

Действие термоэлектрических термометров основано на эффекте Зеебека, который заключается в том, что на стыке двух разнородных металлов возникает термоЭДС, значение которой зависит от температуры.

При выборе материалов для термоэлектрических термометров учитывают: значение термоЭДС, ее зависимость от температуры, стабильность показаний, механическую прочность, термостойкость (при высоких температурах), химическую стойкость (в агрессивных средах). Чаще всего применяют следующие пары материалов: платинородий (10 % родия) – платина, платинородий (30 % родия) – платинородий (6 % родия), вольфрамрений (20 % рения) – вольфрамрений (5 % рения), хромель-алюмель и хромель-копель.

Рабочий спай термоэлектрического термометра получают путем сварки, пайки или скрутки.

Термоэлектрические термометры имеют следующие достоинства: высокую точность, широкий диапазон измерения, возможность централизации и автоматизации измерений, малую инерционность.

Термоэлектрические термометры (термопары) нашли широкое применение в практике технологического контроля и при выполнении научно-исследовательских работ. В качестве вторичных измерительных приборов, работающих с термоэлектрическими термометрами, применяют милливольтметры и потенциометры. При этом вторичный прибор присоединяется или к свободным концам термопары (рис. 1.4, а), или к термоэлектроду (рис. 1.4, б).

В первом случае у термоэлектрического термометра три конца: рабочий спай 1 погружен в среду, температуру которой измеряют, и свободные концы 2 и 3, которые должны находиться при постоянной (известной) температуре. К свободным концам с помощью соединительных проводов (СП) присоединяется измерительный прибор.

Во втором случае измерительный прибор присоединяется к концам 3 и 4, которые были образованы при разрыве одного из термоэлектродов. Термоэлектрический термометр имеет рабочий спай 1 и свободный 2.

В первом случае необходимо вводить поправку на температуру свободных концов, т. к. термоэлектрические термометры имеют градуировку при температуре свободных концов в  $0^{\circ}\text{C}$ .

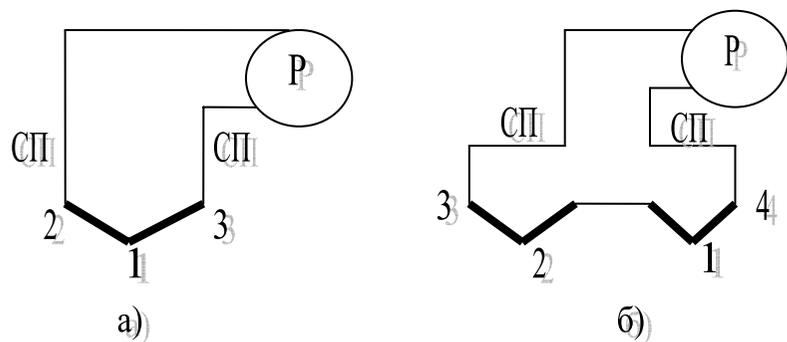


Рис. 1.4. Схема термoeлектрического термометра:  
*а* – присоединение прибора к свободным концам;  
*б* – присоединение прибора в разрыв термоэлектродов

Во втором случае используется термостатирование свободного спая в тающем льде.

На практике наибольшее распространение получила схема с подключением измерительного прибора к свободным концам термопары. При проведении научных исследований с целью повышения точности измерений применяются схемы с термостатированием свободного спая.

### Электронные термометры

Электронный термометр (рис. 1.5) измеряет температуру тела при помощи специального встроенного чувствительного датчика, а результат измерений отображает в цифровом виде на дисплее.

Электронные термометры обладают рядом дополнительных функций в виде памяти последних измерений, звуковых сигналов по времени измерения и результатам измерения, сменных наконечников для гигиеничного применения, водонепроницаемостью корпуса и т.д.

Но для более точного измерения температуры тела человека электронным термометрам потребуется более плотный контакт измерительного датчика с поверхностью его тела человека.



Рис. 1.5. Электронный термометр

### Преимущества:

- прежде всего, безопасность применения, так как в данном термометре нет ртути и его невозможно разбить;
- простота чтения результатов измерения температуры;
- очень короткое время измерения температуры, всего 30–60 секунд. В случае измерения температуры в подмышечной впадине, время увеличивается до 1,5–3 минут;
- автоматически отключается после определенного времени.

Недостатки: необходимо точно придерживаться инструкции при эксплуатации термометра и измерении температуры.

### Пирометры

Пирометрами называют приборы для измерения температуры бесконтактным методом путем использования зависимости характеристики теплового излучения нагретых тел от их температуры.

Градуировка пирометров производится по излучению абсолютно черного тела. Поэтому принято называть условной температуру, измеряемую пирометрами. Эта температура тем больше отличается от действительной, чем значительней отличие излучения реального (серого) тела от излучения абсолютно черного тела. Действительную температуру определяют с учетом коэффициента теплового измерения тела, температуру которого измеряют.

Широкое применение получили пирометры квазимонохроматического и полного излучения. Соответственно различают оптические и радиационные пирометры.

К оптическим пирометрам относят пирометры с исчезающей нитью (рис. 1.6).

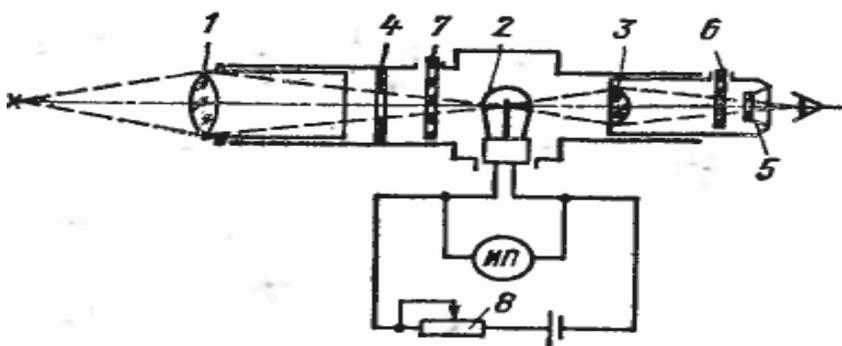


Рис. 1.6. Схема оптического пирометра с исчезающей нитью накала:  
1 – объектив; 2 – пирометрическая лампа; 3 – окуляр; 4 – диафрагма входная;  
5 – диафрагма выходная; 6 – красный светофильтр; 7 – поглощающее стекло;  
8 – реостат

Техника измерения заключается в следующем: прибор объективом направляют на тело, температуру которого измеряют, реостатом регулируют силу тока в пирометрической лампе, добиваясь такого состояния, при котором яркость нити накаливания равна яркости тела. При этом нить на фоне тела становится невидимой, как бы «исчезает». На шкале прибора регистрируют температуру.

В фотоэлектрическом пирометре вместо лампы установлен фотоэлемент с соответствующей аппаратурой для записи показаний.

Радиационные пирометры измеряют радиационную температуру, при которой поверхностная плотность теплового потока излучения абсолютно черного тела равна поверхностной плотности теплового потока излучения реального тела при его температуре (рис. 1.7).

Достоинства пирометров излучения состоят в том, что они позволяют измерять высокие температуры и при их использовании не искажается температурное поле объекта.

Недостатки пирометров излучения заключаются в невысокой точности измерения и в необходимости пересчета для определения действительной температуры.

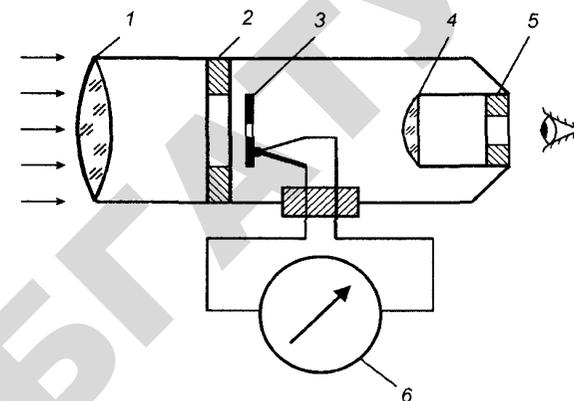


Рис. 1.7. Схема радиационного пирометра:  
1 – объектив; 2, 5 – диафрагмы; 3 – термобатарея; 4 – окуляр;  
6 – измерительный прибор

### Пирометры инфракрасные testo 830-T1, testo 830-T2

Пирометры (инфракрасные термометры) testo 830-T1, testo 830-T2 (рис. 1.8) – это компактные инфракрасные термометры, предназначенные для бесконтактного измерения температуры поверхности.



Рис. 1.8. Общий вид пирометра инфракрасного

Пирометр testo 830-T1 – быстродействующий универсальный инфракрасный термометр с 1-точечным лазерным целеуказателем, с возможностью настройки предельных значений температуры,

имеет функцию подачи сигнала тревоги. Выполнен в эргономичной форме «пистолета».

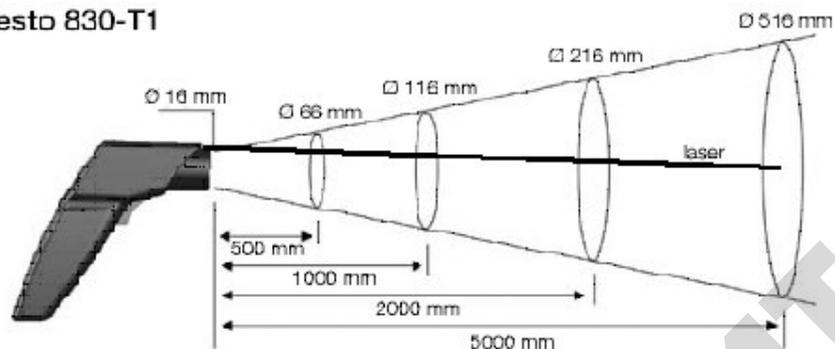
Пирометр testo 830-T2 – универсальный инфракрасный термометр с 2-точечным лазерным целеуказателем, с возможностью настройки предельных значений температуры, имеет функцию подачи сигнала тревоги. Внешний дизайн аналогичен testo 830-T1.

Пирометр testo 830-T2 имеет возможность для подключения внешних зондов и выполнения дополнительных контактных измерений.

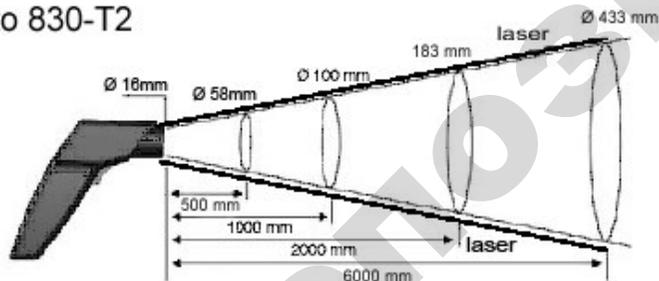
Пятно измерений имеет различный диаметр в зависимости от расстояния между пирометром и объектом измерения.

### Технические характеристики пирометров (инфракрасных термометров) серии testo 830

testo 830-T1



testo 830-T2



Параметр	testo 830-T1	testo 830-T2
Параметры	°C / °F	
Диапазон ИК-измерений	-30 до +400 °C	
ИК-разрешение	0,5 °C	
ИК-погрешность	±1,5 °C или 1,5 % значений (0,1 до +400 °C) <sup>1</sup> ; ±2 °C или 2 % значений (-30 до 0 °C) <sup>1</sup>	
Коэффициент излучения	0,2 до 1,0 корректируемый	
Инфракрасное излучение	0,5 с	
Температурный сенсор		Термопара тип К (подсоединяемая)
Диапазон измерений температурного сенсора	-50 до +500 °C	

### Область применения и правила установки термометров

Выбор метода и средств измерения температуры необходимо производить в зависимости от поставленной задачи, требуемой точности и условий измерения. Теплотехнические измерения предусматривают измерения температуры жидкости, газа и твердого тела (на его поверхности или внутри).

Погрешности измерения температуры определяются конструкцией и теплофизическими свойствами термометра, условиями его теплообмена с измеряемой средой и изменением температуры со временем.

Наиболее широко применяют термоэлектрические термометры (термопары), которые отличаются простым устройством, надежностью и универсальностью использования.

При необходимости более точного измерения температуры используют термометры сопротивления, что объясняется их высокой чувствительностью и возможностью точного измерения электрического сопротивления. Пирометры излучения предназначены для

измерения высоких температур твердых тел, жидких металлов, а также внутри промышленной печи, топочного устройства и камеры сгорания.

Точность измерения температуры зависит от условий измерений, от выбранного места и способа установки термометра (его рабочей, термочувствительной части). Термометр при контактном методе измерения нарушает в той или иной мере температурное поле среды (тела) в месте его установки и показывает собственную температуру своей рабочей части. Эта температура может существенно отличаться от действительной температуры в месте измерения.

Поэтому необходимо в комплексе решать вопросы применения и размещения того или иного типа прибора. Эта теплотехническая задача связана с организацией теплообмена между термометром, окружающей и измеряемой средами. При этом нужно стремиться улучшить теплообмен между термочувствительной частью прибора (резервуаром жидкостного термометра, термометром сопротивления, термобаллоном манометрического термометра и т.п.) и измеряемой средой. В то же время необходимо уменьшить теплообмен этой части термометра с окружающей средой.

Большое влияние на точность измерения оказывают теплообмен излучением между термочувствительной частью термометра и окружающими телами (например, стенкой канала), перенос теплоты теплопроводностью по термометру, торможение потока газа, теплообмен между термочувствительной частью и измеряемой средой.

Погрешности, обусловленные вышеперечисленными причинами, называются методическими и относятся к систематическим погрешностям. Для их уменьшения или устранения используется правильная установка термометров.

При измерении температуры в трубопроводе середину рабочей части термометра располагают по оси трубы в зоне наибольшей скорости, что улучшает теплообмен между движущейся средой и термометром и уменьшает влияние тепловых потерь через стенки. На горизонтальной трубе диаметром до 200 мм термометр устанавливается под углом  $45^\circ$  к оси трубы, а на вертикальной с восходящим потоком – наклонно навстречу потоку. В трубопроводах с небольшим диаметром термометры устанавливаются в месте поворота в восходящем потоке по оси трубопровода. При измерении температуры среды в трубопроводе малого диаметра

(менее 57 мм) необходимо предусматривать расширители для установки термометров.

При установке жидкостных термометров применяют два способа; установку в защитных металлических гильзах или без них. В технических устройствах наиболее распространен способ установки в защитной гильзе.

При установке манометрических термометров термобаллон газовых и жидкостных термометров может быть ориентирован произвольно, а парожидкостных – вертикально, капилляром вверх или с небольшим наклоном.

Снижение методических погрешностей достигается увеличением глубины погружения термометра (особое значение это имеет при установке термометров сопротивления и термоэлектрических термометров), применением тепловой изоляции каналов в шестах установки (крепления) термометров, использованием трубчатых коаксиальных экранов при измерении температур газа с целью уменьшения теплообмена излучением термометра со стенками трубопровода.

### **Проверка средств измерений**

Проверка средства измерений (далее – СИ) – установление пригодности средства измерений к применению на основании контроля соответствия метрологических характеристик требованиям, установленным в государственных стандартах и в технической документации производителя.

Проверке подлежат только те средства измерений, которые внесены в Государственный реестр средств измерений Республики Беларусь (далее – Госреестр СИ РБ) на основании положительных результатов Государственных приемочных испытаний. Проверка осуществляется РУП «Белорусский государственный институт метрологии» (далее – БелГИМ), соответствующими аккредитованными поверочными лабораториями на предприятиях. Проверка проводится по методике, изложенной в государственном стандарте, либо разработанной специально для этого средства измерений и утвержденной БелГИМ в процессе проведения Государственных приемочных испытаний.

Перед приобретением того или иного средства измерения температуры, особенно если это средство должно использоваться на важ-

ном объекте, убедитесь, что оно внесено в Госреестр СИ РФ. Иначе поверка будет невозможна и Вы не сможете получить свидетельство о его пригодности.

## Лабораторная работа № 2

### ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ

#### 1.3. Методика выполнения работы

1. Измерить температуру воздуха в лаборатории или воды в сосуде с помощью жидкостного (ТЖ) и манометрического (ТМ) термометров, термометра сопротивления (ТС) и термопары (ТП).
2. Результаты измерений записать в таблицу 1.2.

Таблица 1.2

Результаты измерений				
Тип термометра	Температура, °С		Класс точности	Абсолютная погрешность
	вода	воздух		
ТЖ				
ТМ				
ТС				
ТП				

#### Контрольные вопросы

1. Определение и физический смысл температуры.
2. Температурные шкалы, методика их построения.
3. Методика измерения температуры.
4. Типы приборов для измерения температуры.
5. Характеристика термометров расширения: схема; принцип действия; область применения; достоинства и недостатки.
6. Характеристика манометрических термометров: схема; принцип действия; область применения; достоинства и недостатки.
7. Характеристика термометров электросопротивления: схема; принцип действия; область применения; достоинства и недостатки.
8. Характеристика термоэлектрических термометров: схема; принцип действия; область применения; достоинства и недостатки.
9. Точность измерения. Запись окончательного результата.
10. Правила установки термометров.
11. Понятие поверки средств измерений.

#### 2.1. Цель работы

Усвоение основ теории и методов измерения давлений в неподвижных и движущихся средах.

#### 2.2. Основные сведения

Давление определяется отношением силы  $F_n$ , действующей на поверхности по нормали, к площади этой поверхности  $A$ :

$$P = \frac{F_n}{A}. \quad (2.1)$$

За единицу давления в международной системе единиц СИ принят 1 Па (Паскаль) или  $1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2$ .

Различают давления атмосферное, избыточное и разрежение.

*Атмосферное*, или *барометрическое*, давление  $B$  соответствует среднему давлению атмосферного воздуха над уровнем моря. Приборы, измеряющие атмосферное давление, называется барометрами.

*Избыточное* давление  $p_n$  есть превышение давления среды над атмосферным ( $p_n > B$ ). Приборы, измеряющие избыточное давление, называются манометрами.

За единицу атмосферного давления принимается давление столба ртути высотой 760 мм рт.ст. (физическая атмосфера обозначается «атм»,  $1 \text{ атм} = 760 \text{ мм рт.ст.}$ ).

Если давление меньше атмосферного  $B$ , то его называют разрежением  $p_v$  ( $p_v < B$ ). Приборы, измеряющие глубокое разрежение, называются вакуумметрами.

*Абсолютное* давление – общее давление, под которым находится жидкость, газ или пар. Оно равно сумме давлений:

$$p_a = p_n + B, \text{ при } p_n > B, \quad (2.2)$$

$$p_a = B - p_b, \text{ при } p_b < B. \quad (2.3)$$

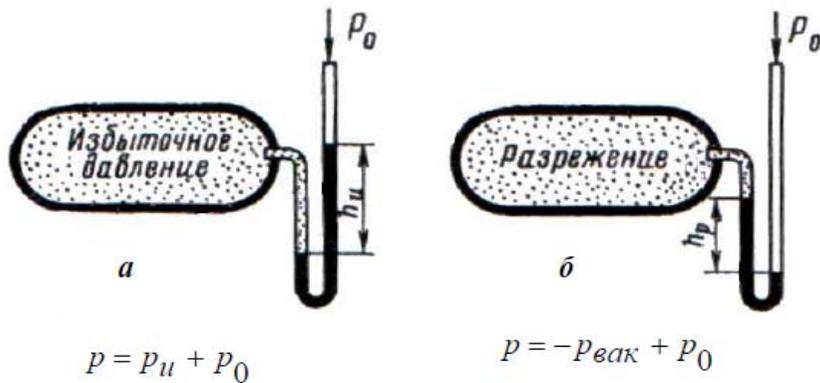


Рис. 2.1. Измерение при помощи U-образного манометра (вакуумметра):  
а – избыточного давления; б – разрежения

Термодинамическим параметром состояния рабочего тела (газа, пара) является абсолютное давление, которое отсчитывается от  $p_a = 0$  (абсолютный вакуум). Абсолютное давление относится к интенсивным параметрам независимым от массы рабочего тела.

В технике широко применяются внесистемные единицы давления:

- 1) техническая атмосфера (ат)  $ат = 1 \text{ кгс/см}^2 = 735,6 \text{ мм рт.ст.}$ ;
- 2) 1 бар =  $1,01972 \text{ кгс/см}^2 = 0,1 \text{ МПа}$ .

Соотношения между некоторыми единицами давления приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1

Соотношения между единицами давления

Единицы измерения	Па	бар	кгс/см <sup>2</sup>	кгс/м <sup>2</sup> (мм вод.ст.)	мм рт.ст.
1 Па	1	$10^{-5}$	$1,0197 \cdot 10^{-5}$	0,10197	$7,5006 \cdot 10^{-3}$
1 Бар	$10^5$	1	1,0197	$1,0197 \cdot 10^4$	750,06
1 кгс/см <sup>2</sup>	$9,8066 \cdot 10^4$	0,98066	1	$10^4$	735,56
1 кгс/м <sup>2</sup> (мм вод.ст.)	9,8066	$0,98066 \cdot 10^{-4}$	$10^{-4}$	1	$7,3556 \cdot 10^{-2}$
1 мм рт.ст.	133,32	$1,3332 \cdot 10^{-3}$	$1,3595 \cdot 10^{-3}$	13,595	1

Методы измерения избыточного давления (разрежения) многообразны, но в основу их положен принцип преобразования давления в перемещение или усилие. Широко используются в технике следующие манометры: жидкостные, которые часто называют пьезометрами; мембранные; пружинные; электрические; тензометрические, пьезоэлектрические датчики давления, ионизационные.

Для примера рассмотрим датчик давления МРХ4115 фирмы «Моторола».

Принцип действия тензометрического датчика давления МРХ4115 на основе прямого пьезоэффекта, заключающегося в появлении разности потенциалов на противоположных концах пьезоэлектрика в зависимости от внешнего давления. Этот датчик позволяет измерять давление воздуха от 15 до 115 кПа. Датчик имеет три основных вывода: два для питания и один – выходной. Выходным сигналом датчика служит напряжение, изменяющееся практически линейно в зависимости от внешнего давления от 0,2 до 4,8 В. Это отражено на рисунке 2.2.

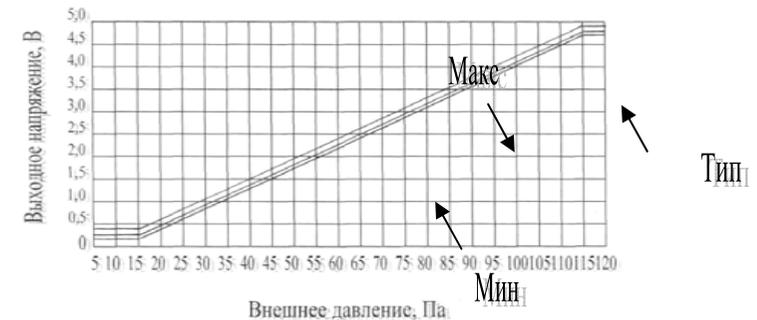


Рис. 2.2. Зависимость выходного напряжения датчика МРХ4115 от внешнего давления

Конструктивно датчик выполнен в пяти вариантах, два из которых (со штуцером – рис. 2.3, а, без него – рис. 2.3, б). Датчик со штуцером может быть установлен в воздухопроводе, датчик без штуцера используется в барометрах для измерения атмосферного давления.

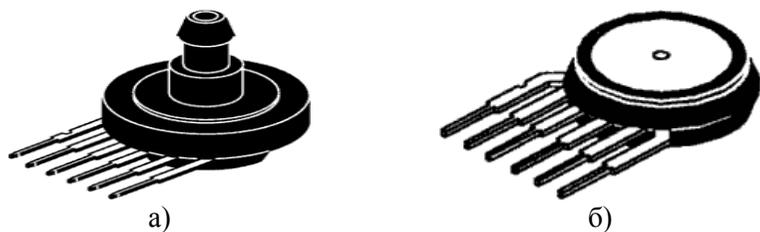


Рис. 2.3. Внешний вид датчиков давления:  
а – со штуцером; б – без штуцера

В датчике МРХ4115 давления, структура которого изображена на рис. 2.4, кроме чувствительного пьезоэлемента, имеется температурный компенсатор, обеспечивающий линейность зависимости измеряемого давления от температуры во всем рабочем диапазоне.

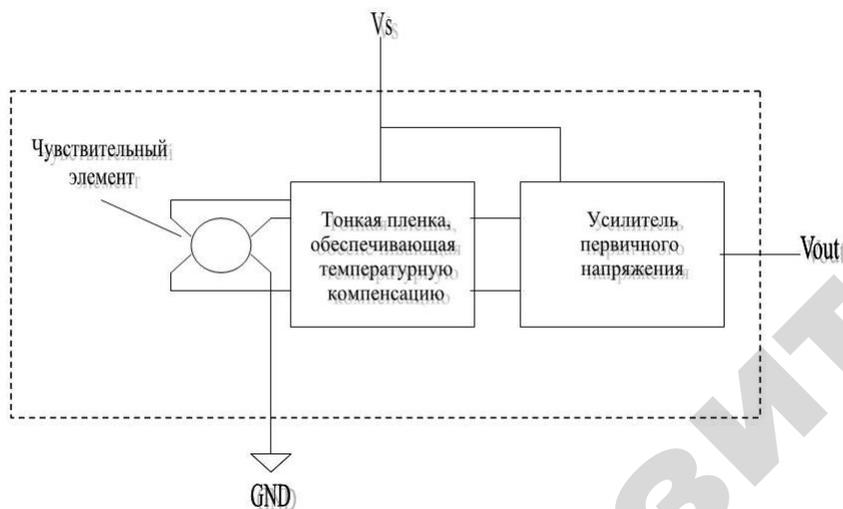


Рис. 2.4. Структура датчика давления

Точность показаний датчика давления, в общем случае, зависит от окружающей температуры. В ней выделяются три прямолинейных участка. В диапазоне от 0 до 85 °С точность датчика давления не зависит от окружающей температуры и равна 1 %, а в диапазоне отрицательных и высоких для датчика (более 85 °С) температур

необходима температурная коррекция на уровне обработки сигналов в микроконтроллере. Для этого рекомендуется дополнительная установка в системах автоматизации датчика температуры.

В жидкостных манометрах измеряемое давление или разность давлений уравнивается гидростатическим давлением столба жидкости. В приборах используется принцип сообщающихся сосудов. Жидкостные манометры отличаются простотой устройства и повышенной точностью измерения. Применяются для поверки и калибровки приборов других систем, а также для технических измерений. В качестве рабочей жидкости используются подкрашенный этиловый спирт, ртуть, дистиллированная вода, а в некоторых случаях – керосин, толуол и др.

На рис. 2.5 приведены двухтрубный и однотрубный манометры. Для измерения давления и разности давлений используют двухтрубные манометры и дифманометры с видимым уровнем, часто называемыми U-образными. Принципиальная схема такого манометра представлена на рис. 2.5, а. Две вертикальные сообщающиеся стеклянные трубки 1, 2 закреплены на металлическом или деревянном основании 3, к которому прикреплена шкальная пластинка 4. Трубки заполняются рабочей жидкостью до нулевой отметки. В трубку 1 подается измеряемое давление, трубка 2 сообщается с атмосферой. При измерении разности давлений к обеим трубкам подводятся измеряемые давления.

В жидкостных манометрах функции чувствительного элемента, воспринимающего изменения измеряемой величины, выполняет рабочая жидкость, выходной величиной является разность уровней, входной – давление или разность давлений.

Если  $p_2 = B$ , то  $p_{и1} = p_1 - B$  или  $p_{и1} = h$  мм рт.ст., если  $p_2 = p_{и2}$  и  $p_1 = p_{и1}$ , то  $\Delta p = h_1 + h_2$  (дифманометр).

Для измерения давлений воздуха в вентиляционных каналах, а также разности давлений в различных точках воздуховодов применяются микроманометры различных типов. Простейшим микроманометром является сообразная стеклянная трубка, заполненная какой-либо жидкостью до нулевой отметки. Если один конец трубки резиновым шлангом присоединить к точке измерения, то разность уровней жидкости в коленях трубки покажет величину измеряемого давления. Для более точных измерений микроманометром

метры изготавливают с одной наклонной трубкой. Вторым «коленом» в этом случае является емкий резервуар (рис. 2.5, б).

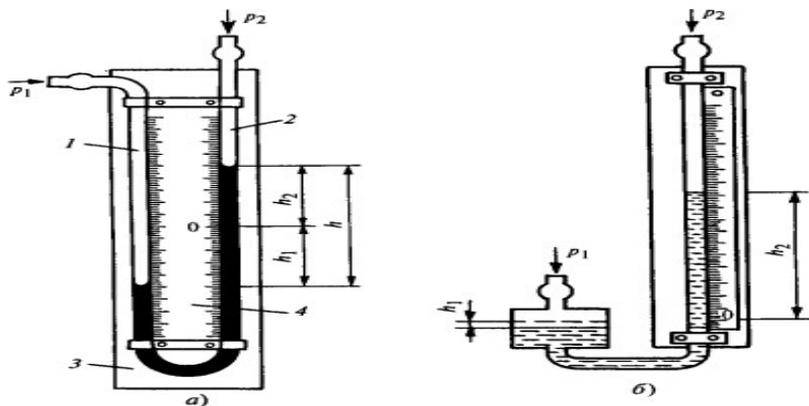


Рис. 2.5. Схемы двухтрубного (а) и однотрубного (б) манометров:  
1, 2 – вертикальные сообщающиеся стеклянные трубки; 3 – основание;  
4 – шкальная пластина

В практике испытаний наибольшее распространение получил микроманометр типа ММН, точность которого позволяет измерить небольшие давления. Микроманометр типа ММН изображен на рис. 2.6. Угол наклона трубки  $\alpha$  можно изменять, меняя тем самым диапазон измеряемых давлений и точность отсчета. При этом отсчет по шкале должен быть пересчитан по формуле  $h = l \sin \alpha$ , избыточное давление  $p_n = l \rho g \sin \alpha$ , а величины поправок на угол наклона можно найти в соответствующих описаниях приборов.

Для закрепления трубки на стойке имеется пять отверстий. Прибор заполняется этиловым спиртом.

При движении жидкостей и газов по трубопроводам и каналам рассматривают следующие давления: статическое  $p_c$ , динамическое (скоростное)  $p_d$  и полное  $p_n$ .

*Статическое давление* – потенциальная энергия потока, действующая по нормали к стенке канала. При измерении его за начало отсчета принимают атмосферное давление.

*Динамическое давление* – кинетическая энергия потока, давление его на препятствие движению, или давление, которое необходимо сообщить неподвижному потоку для приведения его

в движение со скоростью  $v_0$ . Динамическое давление связано со скоростью потока следующей зависимостью:

$$p_d = \rho \frac{v_0^2}{2}, \quad (2.4)$$

где  $v_0$  – скорость потока, измеренная по оси трубопровода (осевая скорость), м/с;  $\rho$  – плотность вещества, кг/м<sup>3</sup>.

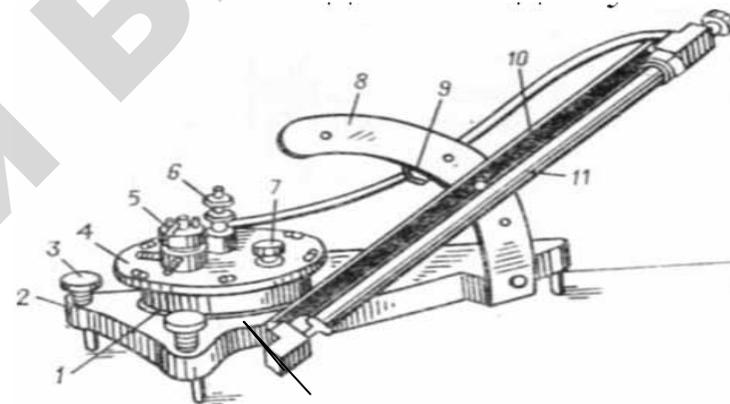


Рис. 2.6. Микроманометр типа ММН:  
1 – резервуар; 2 – станина; 3 – регулировочные винты; 4 – крышка резервуара;  
5 – ручка крана-переключателя; 6 – винт для установки уровня спирта в трубке  
к нулевому давлению шкалы; 7 – пробка; 8 – стойка; 9 – фиксатор;  
10 – металлический кронштейн; 11 – стеклянная измерительная трубка;  
12 – штуцеры для соединения с трубкой МИОТ

*Полное давление* представляет алгебраическую сумму статического и динамического давлений:

$$\pm p_n = \pm p_c + p_d. \quad (2.5)$$

Для неподвижной жидкости  $p_n = \pm p_c$ ,  $p_d = 0$ .

Наибольшее распространение для измерения динамического давления в практике получили напорные или пневмометрические (для

газов) трубки в комплекте с дифференциальными манометрами, тягонапоромерами или микроманометрами. Приемники давления, как правило, делают из двух трубок в различных конструктивных вариантах.

Для восприятия давления в месте измерения и передачи его на микроманометр при испытаниях вентиляционных систем используются пневмометрические трубки со шлангами.

*Трубка Пито* – Г-образная трубка для измерения динамического напора текущих жидкости или газа. Трубка датчика вводится через стенку основного трубопровода и направляется своим отверстием непосредственно навстречу потоку жидкости или газа (рис. 2.7, 2.8). Этот датчик по своей сути играет роль ударного зонда, измеряющего полное давление в лобовой точке напорной трубки  $p_n$ , а второй зонд (статический датчик), измеряющий статическое давление (или гидродинамическое давление в невозмущенном потоке)  $p_c$ , размещается непосредственно в стенке трубопровода. Динамическое давление  $p_d$  (скоростной напор) определяется по разности ударного (полного) и статического давлений и связано со скоростью соотношением, полученным из уравнения Бернулли:

$$p_d = p_n - p_c = \frac{\rho v^2}{2},$$

где  $v$  — скорость движения газа или жидкости в трубопроводе, м/с;  
 $\rho$  — плотность газа или жидкости в рабочих условиях, кг/м<sup>3</sup>;  
 $p_n$  и  $p_c$  — полное и статическое давления, Па.

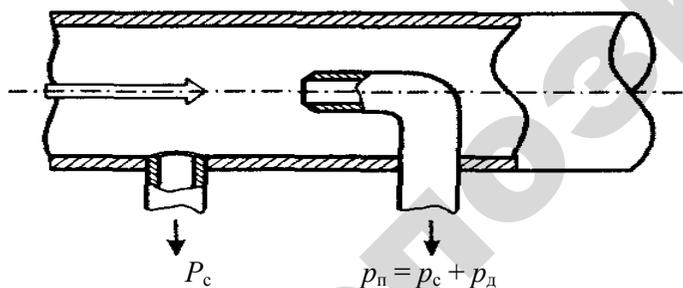


Рис. 2.7. Узел подвода газового потока



Рис. 2.8. Хвостовик трубки Пито

### 2.3. Методика выполнения работы

Лабораторная установка состоит из осевого вентилятора 1, нагнетательного воздуховода 2, 3 – отверстие для установки напорной трубки Пито (рис. 2.9).

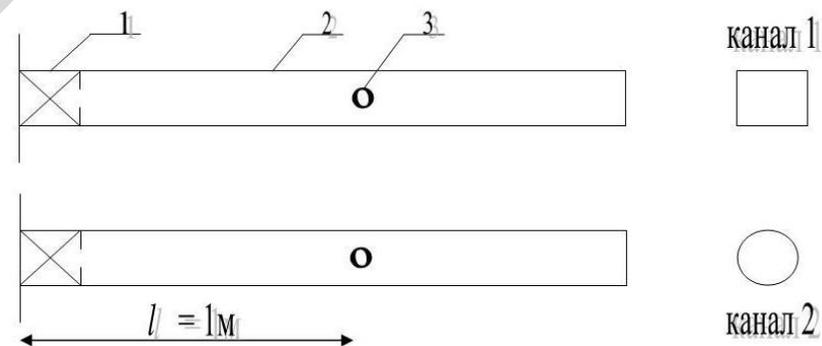


Рис. 2.9. Схема лабораторной установки

Работа выполняется в следующей последовательности:

1. Включается осевой вентилятор 1 и на расстоянии  $l = 1$  м в центре нагнетательного воздуховода 2 устанавливается напорная трубка, подсоединенная к микроманометру.
2. Трубку напорную устанавливают загнутым концом навстречу потоку газа. Ось загнутого конца должна быть параллельна направлению движения газа. Канал полностью открыт.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВЛАЖНОГО ВОЗДУХА

## 3.1. Цель работы

Усвоение основ теории и методов измерения влажности воздуха, изучение устройства и принципа действия используемых приборов.

## 3.2. Основные сведения

Влажный воздух представляет смесь сухого атмосферного воздуха и паров воды. Влажный воздух является рабочим телом в различных теплотехнологических процессах, например сушка и хранение сельскохозяйственных продукции, в системах вентиляции и кондиционировании воздуха.

Смесь сухого воздуха и перегретого пара называется ненасыщенным влажным воздухом. Смесь сухого воздуха и насыщенного водяного пара называется насыщенным влажным воздухом. Температура при которой ненасыщенный влажный воздух переходит в насыщенный влажный воздух называется температурой точки росы  $T_S$ . Сухой атмосферный воздух по массовым долям на разных широтах земного шара, высоте над уровнем моря, городах и сельских населенных пунктах несколько отличается. Приблизительный состав сухого атмосферного воздуха по массовым долям:  $g_{N_2} = 75,50 \%$ ,  $g_{O_2} = 23,1 \%$ ,  $g_{H_2CO_3} \cong 0,005 \%$ ,  $g_{CO_2} \cong 0,55 \%$ .

Влажный воздух удобно представить как бинарную смесь сухого воздуха и водяного пара, для которой выполняется закон Дальтона:

$$B = P_{Cв} + P_{П}, \quad (3.1)$$

где  $B$  – атмосферное давление;  $P_{Cв}$ ,  $P_{П}$  – парциальное давление сухого воздуха и водяного пара, Па.

Парциальные давления  $P_{Cв}$  и  $P_{П}$  определяют из уравнения Клапейрона – Менделеева

С помощью резиновых шлангов напорную трубку соединяют с микроманометром. При положительных давлениях используют штуцер микроманометра со знаком «плюс», при отрицательных – штуцер со знаком «минус». При измерении динамического давления присоединяют трубку полного давления к штуцеру со знаком «плюс», а трубку статического давления к штуцеру со знаком «минус». Определяют значения  $p_c$ ,  $p_n$  и  $p_d$  для воздухопроводов круглого и прямоугольного сечений и заносят в таблицу.

3. По результатам измерения динамического давления рассчитывают скорость газа в центре канала

$$p_d = \frac{\rho g^2}{2} \Rightarrow g = \sqrt{2 \frac{p_d}{\rho}},$$

где  $\rho$  и  $v$  – плотность и скорость газа.

Скорость газа вблизи стенки всегда меньше, чем в центре.

4. Перекрывают канал и измеряют  $p_c$ ,  $p_n$  и  $p_d$ . Данные записывают в таблицу.

№ п/п	Положение канала	$p_c$	$p_n$	$p_d$	$v$
1	Канал 1 открыт				
2	Канал 1 закрыт				
3	Канал 2 открыт				
4	Канал 2 закрыт				

## Контрольные вопросы

1. Что называется избыточным давлением?
2. Что называется абсолютным давлением?
2. Назовите приборы, измеряющие атмосферное давление.
3. Назовите приборы, измеряющие избыточное давление.
4. Приведите определения статического, динамического и полного давлений.
5. Приведите определение динамического давления.
6. Приведите определение полного давления.
7. Опишите устройство и схемы присоединения пневмометрической трубки.

$$P_{Cв} = \frac{m_{Cв}RT}{VM_{Cв}}, \quad (3.2)$$

где  $m_{Cв}$  – масса сухого воздуха;  $R_m = 8,314$  кДж/(кмоль К) – универсальная газовая постоянная;  $V_{Cв} = 29 \cdot 10^{-3}$  кг/моль;  $V$  – объем влажного воздуха.

Абсолютная влажность воздуха определяется массой водяного пара, содержащегося в единице объема воздуха. Она представляет собой плотность водяного пара при его парциальном давлении и температуре влажного воздуха.

Относительной влажностью воздуха называют отношение плотности водяного пара в составе влажного воздуха к максимально возможной плотности пара при той же температуре. Такой максимальной плотностью является плотность насыщенного водяного пара при температуре влажного воздуха.

Относительная влажность может быть представлена как отношение парциальных давлений водяного пара в составе воздуха и насыщенного водяного пара при температуре влажного воздуха.

Таким образом, относительная влажность

$$\varphi = \frac{p_{п}}{p^H} 100 \% = \frac{P_{п}}{P_S} 100 \%, \quad (3.3)$$

где  $p_{п}$  и  $P_{п}$  – плотность водяного пара (абсолютная влажность), кг/м<sup>3</sup>, и его парциальное давление, кПа;  $p^H$  и  $P_S$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>, и парциальное давление насыщенного водяного пара при температуре влажного воздуха, кПа.

Относительная влажность показывает степень увлажненности воздуха при температуре влажного воздуха, которая определяет парциальное давление.

При  $\varphi < 100$  % водяные пары находятся в перегретом состоянии и влажный воздух называют ненасыщенным, при  $\varphi = 100$  % влажный воздух называют насыщенным. Перенасыщенным влажным воздухом называют воздух при  $t > 0$  °С, когда жидкая фаза вытесняет сухой воздух (густые туманы, ливни). Перенасыщенный влажный воздух при  $t < 0$  °С называют ледяным туманом (мельчайшие кристаллики льда вытесняют сухой воздух).

Относительная влажность  $\varphi$  связана с влагосодержанием  $d$ .  
Отношение массы водяного пара  $M_{п}$ , содержащегося во влажном воздухе к массе сухого воздуха  $M_{Cв}$ , называют влагосодержанием.

$$d = \frac{M_{п}}{M_{Cв}} = 0,622 \frac{P_{п}}{B - P_{п}}. \quad (3.4)$$

Из формул (3.3) и (3.4) следует

$$d = 0,622 \frac{\varphi P_S}{B - \varphi P_S}. \quad (3.5)$$

Максимальное влагосодержание  $d_{max}$  при полном насыщении воздуха водяными парами  $\varphi = 100$  %

$$d_{max} = 0,622 \frac{P_S}{B - P_S}. \quad (3.6)$$

При измерении влажности используют следующие методы: гигрометрический, психрометрический и по точке росы.

### 3.3. Гигрометрический метод

Гигрометрический метод измерения влажности основан на зависимости физических свойств гигроскопических материалов от влажности окружающей среды. Гигроскопические материалы способны поглощать влагу из окружающей среды.

Практическое применение нашли гигроскопические методы, использующие изменение длины человеческого волоса и электрического сопротивления гигрометрического материала в зависимости от влажности воздуха.

В простейших гигрометрах (рис. 3.1) в качестве чувствительного элемента предусматривается пучок обезжиренных человеческих волос  $1$ . Деформация пучка волос при изменении влажности передается на стрелку  $3$  с помощью передаточного механизма.

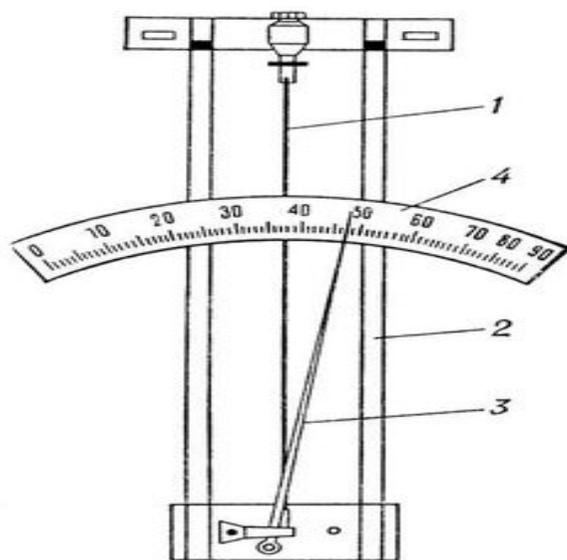


Рис. 3.1. Волосяной гигрометр:  
1 – волос; 2 – рамка; 3 – стрелка; 4 – шкала

Такие гигрометры применяются при определении относительной влажности воздуха при положительных и отрицательных температурах (до минус 35 °С). Они являются простыми по устройству, однако имеют недостаточную чувствительность (относительная погрешность составляет 10 %) и ненадежность в работе из-за возможных загрязнений чувствительного элемента.

Для автоматической регистрации изменений относительной влажности воздуха в течение длительного промежутка времени служит гигрограф М-21.

Гигрограф М-21 содержит чувствительный элемент (пучок обезжиренных волос, перемещающий стрелку с пером через передаточный механизм), барабан, вращающийся от часового механизма, и бумажную диаграммную ленту, закрепленную на барабане.

Все большее применение находят электролитические датчики, основанные на изменении электрического сопротивления электролита в зависимости от влажности воздуха.

С увеличением влажности воздуха уменьшается электрическое сопротивление раствора электролита, что приводит к увеличению тока между электродами. В результате раствор электролита нагревается, часть воды из него испаряется и электрическое сопротивление увеличивается. Таким образом, устанавливается некоторая равновесная температура раствора, которая измеряется термометром сопротивления и определяет влажность окружающей воздушной среды.

Электролитические датчики являются надежными и достаточно чувствительными. Их показания практически не зависят от скорости измеряемой среды, ее давления и загрязнения. Погрешность измерения влажности не превышает 2 %. Недостатки связаны с необходимостью использования источника переменного тока и вторичного измерительного прибора.

### 3.4. Психрометрический метод

Наиболее распространенным является психрометрический метод, который основан на зависимости между влажностью и разностью показаний «сухого» и «мокрого» термометров, называемой «психрометрической разностью».

Психрометром (рис 3.2, 3.3) называется прибор для измерения температуры и влажности, состоящий из двух термометров 2: «сухого» и «мокрого». Чувствительный элемент «мокрого» термометра обернут смоченной тканью (батистом или марлей) 3.

Для измерения температуры обычно предусматривают жидкостные термометры, значительно реже используют термометры сопротивления и термометры в комплекте с автоматическими мостами и потенциометрами. Термометры сопротивления и термопары размещают в пористых керамических фитилях, смачиваемых водой.

С поверхности ткани или керамического фитиля происходит испарение влаги. В связи с этим температура воды, смачивающей ткань или фитиль, оказывается ниже температуры воздуха, а температура по «мокрому» термометру – ниже температуры по «сухому» термометру.

Расчет проводится по психрометрическому графику (рис. 3.4).

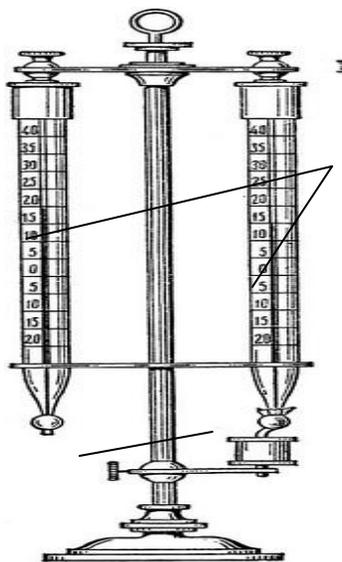


Рис. 3.2. Стационарный психрометр (психрометр Августа):  
1 – термометры; 2 – ткань; 3 – чашка для смачивания ткани

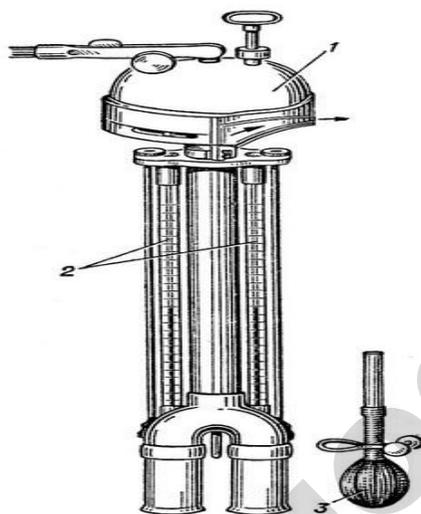


Рис. 3.3. Аспирационный психрометр (психрометр Асмана):  
1 – вентилятор; 2 – психрометрические термометры; 3 – пипетка для смачивания влажного термометра

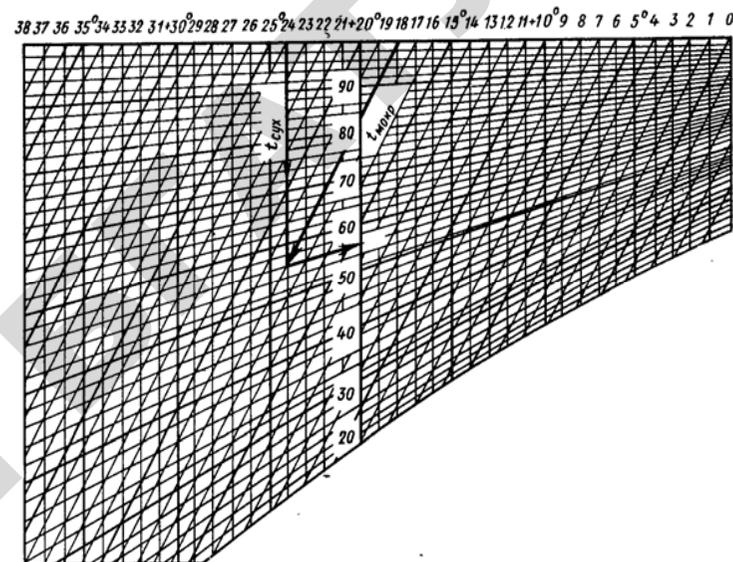


Рис. 3.4. Психрометрический график

Измерение влажности необходимо производить при установлении теплового баланса между подводом теплоты к испаряющейся воде из окружающей среды и расходом теплоты на испарение воды. Разность показаний термометров тем больше, чем меньше влажность воздуха. Это объясняется более интенсивным испарением воды в воздухе с меньшей влажностью. Если же влажный воздух является насыщенным, то испарение воды прекращается, и показания двух термометров становятся одинаковыми.

Психрометрический метод характеризуется следующей зависимостью:

$$\varphi = \frac{P_{SM} - AB(t_C - t_M)}{P_{Sc}} 100 \%, \quad (3.7)$$

где  $P_{SC}$  и  $P_{SM}$  – давления насыщенного водяного пара при температурах по «сухому» и «мокрому» термометрам, кПа;  $t_C$  и  $t_M$  – температуры по «сухому» и «мокрому» термометрам, °С;  $A$  – постоянная психрометра, К;  $B$  – атмосферное давление, кПа.

Постоянная психометра определяется условиями теплообмена резервуара «мокрого» термометра с окружающей средой. Для повышения точности психометров необходимо ослабить лучистый теплообмен с окружающими телами и интенсифицировать конвективный теплообмен смоченной ткани с влажным воздухом.

В связи с этим предусматривают: размещение резервуаров термометров внутри трубок защиты от лучистого теплообмена, тепловою изоляцию этих трубок друг от друга и увеличение скорости обдува воздухом резервуаров термометров до 2,5 м/с и более.

Постоянная психометра при скорости воздуха, омывающего резервуар «мокрого» термометра, не меньше 0,5 м/с:

$$A = \left( 65 + \frac{6,75}{v} \right) 10^{-5}, \quad (3.8)$$

где  $v$  – скорость обдува воздухом, м/с.

При отсутствии искусственно создаваемого потока воздуха следует принимать

$$A = 8 \cdot 10^{-4} K^{-1}. \quad (3.9)$$

Для определения влажности по показаниям психометра используют психометрические таблицы, графики и номограммы.

Психометры с жидкостными термометрами подразделяются на простые и аспирационные. Схема простых психометров (психометров Августа) соответствует рис. 3.2. Для определения относительной влажности используют психометрические таблицы, составленные в зависимости от показания «сухого» термометра и разности показаний «сухого» и «мокрого» термометров.

Аспирационные психометры отличаются от простых использованием встроенного вентилятора для организации принудительного движения влажного воздуха через психометр, что позволяет увеличить точность измерения относительной влажности. Такие психометры предназначены для определения относительной влажности воздуха в пределах от 10 до 100 % при температуре воздуха от минус 10 до 40 °С.

Выпускаются аспирационные психометры МВ-4М с механическим приводом и М-34 с электродвигателем. Они состоят из двух

ртутных термометров, трубок защиты от лучистого теплообмена, аспирационной чашки, воздухопроводной трубки к вентилятору, защиты термометров от повреждений и аспирационной головки, внутри которой размещены вентилятор и его привод.

Перед использованием аспирационного психометра резервуар «мокрого» термометра обертывают батистом в один слой и смачивают чистой (рекомендуется дистиллированной) водой. Для этого используют резиновый баллон с пипеткой. Пипетку вводят в трубку защиты и смачивают батист.

Измерение температур производят через 5 минут после пуска вентилятора. При использовании психометров МВ-4М предварительно заводят пружину вентилятора. Электродвигатель в психометрах М-34 включают только на время измерения влажности.

Относительную влажность определяют по психометрическому графику (рис. 3.3). По вертикальным линиям отмечают показания «сухого» термометра, а по наклонным – показания «мокрого» термометра. В точке пересечения линий получают значение относительной влажности. Линии постоянной относительной влажности проведены через каждые 2 %, на ряде линий нанесены значения 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 и 90 %.

Достоинства психометрического метода заключаются в надежности устройства и в достаточной чувствительности при температурах выше 0 °С. Относительная погрешность аспирационных психометров при положительных температурах воздуха и его относительной влажности больше 20 % не превышает 5 %.

Недостатки психометрического метода состоят в уменьшении чувствительности при низких температурах и в необходимости оборудования для смачивания резервуара «мокрого» термометра. Недостатком рассмотренных психометров является также невозможность осуществить измерение и запись относительной влажности воздушной среды без участия человека.

С целью устранения указанного недостатка разработаны и серийно выпускаются электрические психометры ПЭ, в которых в качестве «сухого» и «мокрого» термометров используются проволочные термометры сопротивления. Измерение психометрической разности и автоматическая компенсация влияния температуры окружающего воздуха осуществляются с помощью вторичного прибора – автоматического электрического моста.

Электрические психрометры ПЭ предназначены для измерения относительной влажности воздуха в пределах от 20 до 100 % (в зависимости от типа датчика).

### 3.5. Метод измерения по точке росы

Метод измерения влажности по точке росы основан на определении температуры, при которой воздух становится насыщенным. В таких влагомерах создаются условия для выпадения росы и определяется температура, при которой это происходит.

Основным чувствительным элементом является зеркальная поверхность, которая обдувается воздухом и на которой происходит конденсация водяного пара. Зеркальная поверхность охлаждается жидкостью, температура подогрева которой регулируется с помощью фотоэлемента, установленного в системе регулирования подогревателя.

На фотоэлемент падает луч света, отражаемый зеркальной поверхностью. При конденсации водяных паров происходит ослабление светового потока.

Температура зеркальной поверхности поддерживается равной температуре точки росы и измеряется термоэлектрическим термометром.

Подобные влагомеры являются одними из наиболее точных и позволяют измерять влажность как при положительных, так и при отрицательных температурах, однако они являются сложными, их показания зависят от состояния зеркальной поверхности и от состава воздуха. Наличие агрессивных газов вызывает коррозию зеркальной поверхности и приводят к значительной погрешности прибора.

В настоящее время широко используются емкостные датчики влажности, например, в приборе testo-635.

Рассмотрим для примера датчик относительной влажности DTI НН-4000 фирмы Honeywell.

Принцип действия датчика относительной влажности – емкостный, основанный на измерении реактивного сопротивления  $R = 1/(\omega C)$  на частоте  $\omega$  встроенного в датчик генератора. Конструктивно датчик выполнен в виде плоскопараллельного конденсатора с площадками обкладок в несколько мм<sup>2</sup>, расположенных на расстоянии в несколько десятков микрон. Емкость датчика

$C = \epsilon \epsilon_0 \frac{S}{d}$  прямо пропорциональна диэлектрической проницаемости  $\epsilon$ , зависящей от относительной влажности  $\phi$  окружающей среды. Следовательно, зависимость измеряемой относительной влажности  $\phi$  пропорциональная:  $\phi = \frac{kd}{\epsilon_0 S \omega R}$ , где  $k$  – коэффициент пропорциональности.

Внешний вид датчика представлен на рис. 3.5, а его структура отражена на рис. 3.6. В структуре датчика инвертор предназначен для преобразования переменного напряжения на емкости на постоянное выходное.



Рис. 3.5. Внешний вид датчика относительной влажности

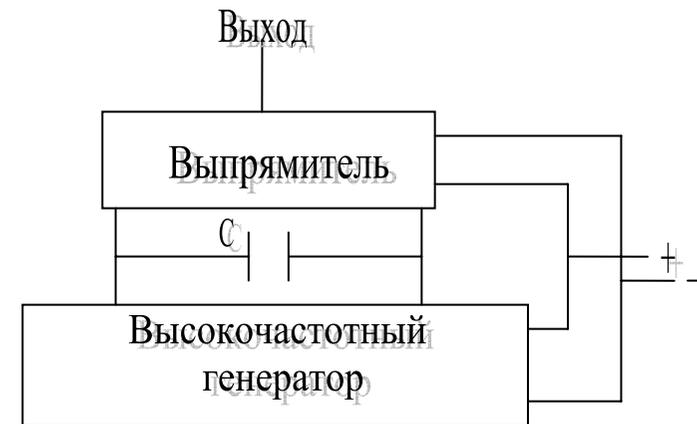


Рис. 3.6. Структура датчика относительной влажности

Датчик имеет три вывода: два вывода питания и один – выходного напряжения. Емкость датчика варьируется в пределах нескольких единиц десятка пФ, его реактивное сопротивление на частоте в несколько десятков МГц измеряется сотнями кОм.

Зависимость выходного напряжения датчика от относительной влажности представлена на рис. 3.7, а рекомендуемый рабочий температурный диапазон – на рис. 3.8.

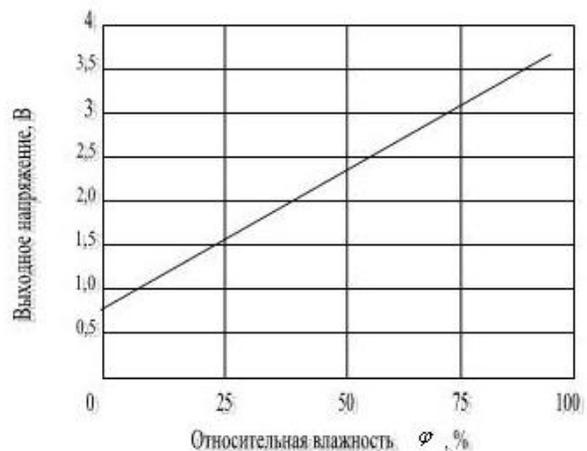


Рис. 3.7. Зависимость выходного напряжения от относительной влажности



Рис. 3.8. Рабочий температурный диапазон датчика НН-4000 относительной влажности

Основные параметры датчика:

- тип аналоговый;
- питание  $V_{supply}$  4,0 ÷ 5,8 В (стандарт 5 В);
- диапазон измеряемых значений относительной влажности 0...100 %;
- выходное напряжение  $V_{out} = V_{supply} \cdot (0,0062\varphi + 0,16)$ ;
- потребляемый ток 500 мкА;
- точность 3,5 % при аппроксимации прямой, 2,5 % при аппроксимации квадратичной параболой;
- стабильность 1,2 % в год;
- время измерения влажности 70 мс;
- рабочий температурный диапазон – -40 ... +85 °С.

Основной недостаток данного датчика в запыленности в межэлектродном пространстве конденсатора, что приводит к погрешностям измерения относительной влажности.

### 3.6. Методика выполнения работы

После изучения методов и приборов для измерения влажности необходимо измерить влажность воздуха в лаборатории с помощью психрометров и гигрометров. Полученные результаты измерения записать в таблицу 3.1 и сравнить между собой. При измерении относительной влажности с помощью гигрометра психрометрического ВИТ-1 и аспирационного психрометра МВ-4М используют таблицу 3.2.

Таблица 3.1

Название прибора	Результаты измерений		
	$t_c, ^\circ\text{C}$	$t_M, ^\circ\text{C}$	$\varphi, \%$
Гигрометр			
Гигрометр психрометрический ВИТ-1			
Аспирационный психрометр МВ-4М			

Таблица 3.2

Психрометрическая таблица											
Показания сухого термометра $t_c, ^\circ\text{C}$	Разность показаний сухого и влажного термометров, $^\circ\text{C}$										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Влажность воздуха, %										
0	100	81	63	45	28	11	—	—	—	—	—
2	100	84	68	51	35	20	—	—	—	—	—
4	100	85	70	56	42	28	14	—	—	—	—
6	100	86	73	60	47	35	23	10	—	—	—
8	100	87	75	63	51	40	28	18	7	—	—
<b>10</b>	100	88	76	65	54	44	<b>34</b>	24	14	5	—
12	100	89	78	68	57	48	38	29	20	11	—
14	100	89	79	70	60	51	42	34	25	17	9
16	100	90	81	71	62	54	45	37	30	22	15
18	100	91	82	73	65	56	49	41	34	27	20
20	100	91	83	74	66	59	51	44	37	30	24
22	100	92	83	76	68	61	54	47	40	34	28
24	100	92	84	77	69	62	56	49	43	37	31
26	100	92	85	78	71	64	58	51	46	40	34
28	100	93	85	78	72	65	59	53	48	42	37
30	100	93	86	79	73	67	61	55	50	44	39

Пример: если  $t_c = 10 ^\circ\text{C}$  и  $t_M = 4$ , то  $\Delta t = 10 - 4 = 6 ^\circ\text{C}$ , тогда  $\varphi = 34 \%$ .

### Контрольные вопросы

1. Приведите определение абсолютной влажности воздуха.
2. Приведите определение относительной влажности воздуха.
3. Охарактеризуйте методы измерения влажности воздуха.
4. Опишите устройство психрометров.
5. Опишите устройство гигрометров.
6. Покажите, как по показаниям психрометра определить влажность воздуха.
7. Укажите недостатки психрометров и гигрометров.
8. Назовите преимущества психрометров и гигрометров.
9. Укажите область использования психрометров и гигрометров.

## Лабораторная работа № 4

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВЛАЖНОГО НАСЫЩЕННОГО ПАРА

#### 4.1. Цель работы

Усвоение основ теории и особенностей процесса парообразования, методики определения параметров состояния водяного пара.

#### 4.2. Основные сведения

Вода и водяной пар широко применяются в промышленности, сельском хозяйстве и в коммунально-бытовом обслуживании потребителей. Данное обстоятельство обусловлено доступностью вещества, экологичностью, экономичностью и относительной безопасностью при его использовании.

Водяной пар является основным рабочим телом для паросиловых установок в современной теплоэнергетике. Он применяется в качестве теплоносителя в системах теплоснабжения, отопления и вентиляции, а также на технологические нужды в сельскохозяйственном производстве: для запаривания кормов, пастеризации молока, подогрева обрат, обеззараживания навоза и грунта и т.д.

Процесс парообразования может происходить в результате испарения, кипения воды и сублимации льда.

Под *испарением* обычно подразумевается парообразование, происходящее со свободной поверхности жидкости. При этом отдельные молекулы жидкости, обладающие большими скоростями, преодолевают притяжение соседних молекул и вылетают в пространство над поверхностью, образуя пар. Испарение происходит при любой температуре жидкости. При повышении температуры интенсивность испарения увеличивается. Если подвод теплоты отсутствует, температура жидкости при испарении уменьшается.

Процесс парообразования над твердой поверхностью воды (льдом) называется *сублимацией*. Его интенсивность значительно ниже, чем при испарении жидкости.

*Кипением* называется бурный процесс парообразования во всем объеме жидкости. Кипение состоит в интенсивном, непрерывном образовании пузырьков пара в центрах парообразования (неровности поверхности сосуда, твердые частицы, пузырьки газов). Паровые пузырьки поднимаются вверх к поверхности жидкости, увеличиваясь в объеме в десятки раз из-за уменьшения гидростатического давления на поверхности пузырьков и парообразования через эту поверхность.

Кипение возможно только при подводе теплоты и при вполне определенной температуре, называемой температурой кипения ( $T_k$ ), которая зависит от внешнего давления на поверхности жидкости. С увеличением давления температура кипения воды повышается.

Одновременно с парообразованием происходит противоположно направленный процесс – *конденсация пара*.

Пар, находящийся в состоянии динамического равновесия с жидкостью, из которой он образовался, называется *насыщенным*.

Различают *сухой насыщенный, влажный насыщенный и перегретый* пары.

*Сухой насыщенный пар* – это газообразное состояние вещества, характеризующееся температурой насыщения и наибольшей плотностью при заданном давлении. Это состояние пара задается одним из основных термодинамических параметров: температурой, или давлением насыщения или удельным объемом. Температура насыщения ( $T_s$ ) практически равна температуре кипения при заданном давлении насыщения.

*Влажный насыщенный пар* представляет собой двухфазную систему, состоящую из сухого насыщенного пара и жидкости при температуре насыщения. Это состояние пара характеризуется двумя параметрами: степенью сухости пара и температурой, или давлением насыщения, или удельным объемом.

*Перегретым* называется пар, у которого температура при заданном давлении больше температуры насыщения. Его состояние характеризуется двумя основными параметрами: давлением и температурой, или удельным объемом и давлением, или температурой и удельным объемом.

Состояние сухого насыщенного пара является неустойчивым. Подвод или отвод теплоты превращает его в перегретый или влаж-

ный насыщенный пар, что очень наглядно видно на  $h$ - $S$ -диаграмме Молье – Вукаловича для водяного пара.

*Степень сухости пара* ( $x$ ) представляет собой массовую долю сухого насыщенного пара в составе влажного насыщенного пара

$$x = \frac{m_{\text{снп}}}{m_{\text{внп}}}, \quad (4.1)$$

где  $m_{\text{снп}}$  – масса сухого насыщенного пара;  $m_{\text{внп}}$  – масса влажного насыщенного пара.

Степень сухости пара может изменяться от нуля до единицы. Для воды, нагретой до температуры насыщения (кипения)  $x = 0$ , а для сухого насыщенного пара и перегретого пара  $x = 1$ .

При термодинамических расчетах необходимо знать не абсолютные значения внутренних энергий и энтальпий начала и конца процесса, а их разность. За начало отсчета для воды и водяного пара принимается тройная точка, в которой вода находится в трех равновесных фазовых состояниях: твердом, жидком и газообразном ( $P_0 = 610,8$  Па,  $t = 0,01$  °С,  $v_0 = 0,001$  м<sup>3</sup>/кг). В этом состоянии условно принято, что внутренняя энергия воды  $U_0 = 0$ , тогда энтальпия  $h_0 = P_0 v_0 = 0,611$  Дж/кг, т.е. малая величина. Поэтому в практических расчетах принимают  $h_0 \cong 0$ .

При увеличении давления температура насыщения (кипения) возрастает. Эта зависимость соблюдается в диапазоне давлений от тройной воды до его критического состояния (критическая точка). В критическом состоянии двухфазной системы (жидкость-пар) обе равномерно сосуществующие фазы становятся тождественно равными по всем свойствам и исчезает различие между жидкой и газообразной фазами, т.е. параметры жидкости и сухого насыщенного пара становятся одинаковыми.

Параметры критической точки воды:

$$T_{\text{кр}} = 374,15^\circ \text{C}; v_{\text{кр}} = 0,00326 \text{ м}^3/\text{кг}; p_{\text{кр}} = 22,15 \text{ МПа}.$$

Дифференциальное уравнение первого закона термодинамики, выраженного через энтальпию, можно записать в виде

$$dq = dh - vdp. \quad (4.2)$$

Откуда следует, что если давление системы сохраняется неизменным ( $dp = 0$ ), то теплота, подводимая к рабочему телу в изобарном процессе, расходуется на изменение его энтальпии, т.е.

$$dq = dh.$$

Энтальпия влажного насыщенного пара равна количеству теплоты, которое необходимо для нагрева 1 кг воды в изобарном процессе от  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  до температуры насыщения (кипения) и его последующего превращения в пар до заданной степени сухости ( $x$ )

$$h_x = h' + xr, \quad (4.3)$$

где  $h'$  – энтальпия кипящей воды;  $r$  – скрытая теплота испарения (парообразования).

Энтальпия кипящей жидкости ( $h'$ ) равна теплоте, необходимой для нагрева 1 кг воды от  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  до температуры насыщения (кипения) в изобарном процессе

$$h' = c_v t_k, \quad (4.4)$$

где  $c_v$  и  $t_k$  – удельная теплоемкость и температура кипения ( $v\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) воды при заданном давлении, соответственно.

Скрытая теплота испарения (парообразования) ( $r$ ) равна теплоте, необходимой для превращения 1 кг жидкости в пар при температуре насыщения (кипения) в изобарном процессе.

Энтальпия влажного насыщенного пара

$$S_x = S' + x \frac{r}{T_k}, \quad (4.5)$$

где  $S'$  – энтропия кипящей воды;  $T_k$  – абсолютная температура насыщения (кипения), К.

Удельный объем влажного насыщенного пара

$$v_x = v''x + v'(1-x), \quad (4.6)$$

где  $v''$  и  $v'$  – удельный объем сухого насыщенного пара и кипящей воды, соответственно.

Для сухого насыщенного пара значение энтальпии  $h''$  и энтропии  $S''$  определяются по формулам (4.3) и (4.5) при значении  $x = 1$ .

Теплотехнические расчеты по воде и водяному пару выполняются с помощью соотношений (4.3) – (4.6), таблиц [3] и  $h$ - $S$ -диаграммы Молье – Вукаловича для водяного пара.

### 4.3. Методика выполнения работы

Лабораторная установка (рис. 4.1) состоит из парового котла 2 с электронагревателем 1, который питается от электросети напряжением 220 В. Для измерения давления и температуры пара в котле служат манометр 6 и жидкостный термометр 7. Котел наполняется водой через подающий трубопровод с запорным вентилем 5.

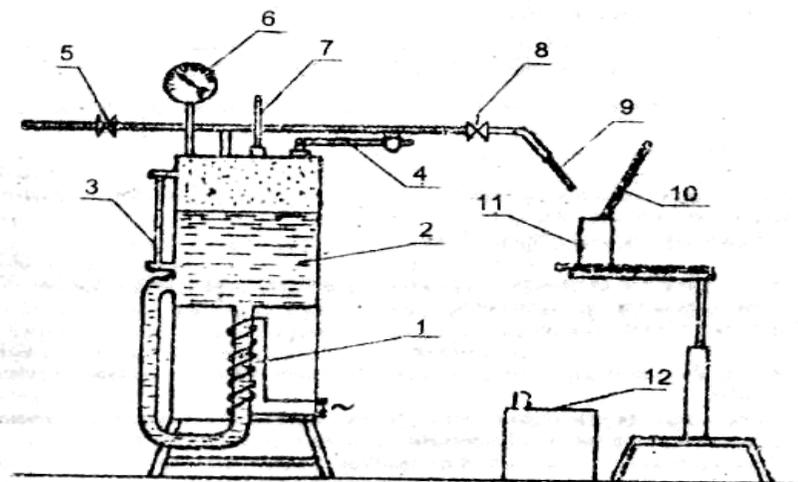


Рис. 4.1. Схема лабораторной установки:

- 1 – электронагреватель; 2 – паровой котел; 3 – водомерное стекло;
- 4 – предохранительный клапан; 5 – вентиль; 6 – манометр; 7 – термометр;
- 8 – паровой вентиль; 9 – паровой зонд; 10 – термометр; 11 – калориметр;
- 12 – дренажный бачок

Водяной пар подается из парового котла в калориметр 11 с водой через паровой вентиль и паровой зонд 9. Энтальпию и степень сухости пара определяют расчетным путем из теплового баланса по экспериментальным данным калориметрирования.

Калориметр состоит из двух пластмассовых стаканов, помещенных один в другой.

Работу выполняют в следующей последовательности.

Ознакомиться с лабораторной установкой и характеристиками используемых приборов. При необходимости довести уровень воды в котле до  $\frac{1}{2}$  уровня по высоте водомерного стекла, путем открытия вентиля 5.

По указанию преподавателя включить установку в электросеть и довести давление пара до 0,12 МПа (1,2 кгс/см<sup>2</sup>) по манометру. При достижении такого давления должно срабатывать реле манометра, регулирующее указанное давление.

Измерить массу калориметра вместе с крышкой без воды  $M_k$ , г, с помощью лабораторных весов.

В малый стакан калориметра налить воду из водопровода до уровня  $\frac{2}{3}$  его высоты и измерить массу калориметра ( $M_{k1}$ , г) с водой.

Измерить температуру воды  $t_1$  в калориметре.

Зонд опустить в отверстие дренажного бачка, приоткрыть паровой вентиль и прогреть зонд путем пропускания через него пара в течение 10...15 с. Затем вентиль закрыть.

Зонд поместить в калориметр под уровень воды и провести нагрев воды паром путем медленного приоткрывания парового вентиля таким образом, чтобы пар не разбрызгивал и не выбрасывал воду наружу. Нагревание воды производить до температуры 60...70 °С и записать измеренное значение температуры  $t_2$  нагретой воды.

Удалить зонд из калориметра и только после этого закрыть вентиль (а не наоборот, что привело бы к засасыванию части воды в зонд и искажению результатов эксперимента) и опустить зонд в дренажный бачок. Соблюдать осторожность в обращении с зондом и при направлении струи пара.

Определить массу калориметра с нагретой водой  $M_{k2}$ , г.

Измерить избыточное давление  $P$ , кгс/см<sup>2</sup>, в котле по манометру и атмосферное давление  $B$ , кПа, по барометру в лаборатории.

Результаты измерения записать в таблицу 4.1.

Результаты измерений и расчетов

Масса калориметра, г			Температура, °С		Давление			Параметры пара			
$M_k$	$M_{k1}$	$M_{k2}$	воды	пара	$B$ , кПа	$P$ , кгс/см <sup>2</sup>	$P_S$ , кПа	$h_{x_s}$ , кДж/кг	$x$	$S_{x_s}$ , кДж/(кг К)	$v_{x_s}$ , м <sup>3</sup> /кг
				$T_S$							

По результатам измерений определить давление пара в котле, кПа,

$$P_S = B + P, \quad (4.7)$$

где  $B$  – барометрическое давление, кПа;  $P$  – давление по манометру (избыточное), кПа.

При пересчете давлений использовать соотношение  $1 \text{ кгс/см}^2 = 98 \text{ кПа}$ . Определить массу воды, г, в калориметре: до нагрева

$$M_1 = M_{k1} - M_k; \quad (4.8)$$

после нагрева

$$M_2 = M_{k2} - M_k. \quad (4.9)$$

Масса пропущенного через воду и сконденсировавшегося в ней пара, г,

$$M = M_2 - M_1. \quad (4.10)$$

Энтальпия пара, кДж/кг,

$$h_x = c_B \left[ \frac{M_1}{M} (t_2 - t_1) + t_2 \right], \quad (4.11)$$

где  $c_B$  – удельная изобарная теплоемкость воды – принять равной 4,19 кДж/(кг·К).

Степень сухости

$$x = \frac{h_x - h'}{r}, \quad (4.12)$$

где  $r$  – удельная теплота парообразования, кДж/кг;  $h'$  – удельная энтальпия воды при температуре насыщения, кДж/кг.

Удельная энтропия пара, кДж/(кг·К),

$$S_x = S' + x \left( \frac{r}{T_S} \right), \quad (4.13)$$

где  $S'$  – удельная энтропия воды при температуре насыщения, кДж/(кг·К);  $T_S$  – термодинамическая температура пара, К.

Удельный объем пара, м<sup>3</sup>/кг,

$$v_x = v''x + v'(1-x), \quad (4.14)$$

где  $v'$  и  $v''$  – удельные объемы сухого насыщенного пара и воды в состоянии насыщения, м<sup>3</sup>/кг.

Параметры пара и воды в состоянии насыщения приведены в приложении 1.

Расчетные значения параметров занести в таблицу 4.1.

Определение относительной погрешности эксперимента

$$\frac{\Delta h_x}{h_x} = \frac{\Delta M_1}{M_1} + \frac{\Delta M_1 + \Delta M_2}{M} + \frac{\Delta t_1 + \Delta t_2}{t_2 - t_1} + \frac{\Delta t_2}{t_2}, \quad (4.15)$$

где  $\Delta M_1$  и  $\Delta M_2$  – абсолютные погрешности определения массы воды до нагрева и после нагрева;  $\Delta t_1$  и  $\Delta t_2$  – абсолютные погрешности измерения температуры, °С.

Абсолютные погрешности определения массы и измерения температуры принять равными погрешностям весов и термометра для измерения температуры воды.

## Контрольные вопросы

1. Назовите и дайте определение процессов парообразования.
2. Дайте определения сухого насыщенного пара.
3. Дайте определение влажного насыщенного пара.
4. Дайте определение перегретого пара.
5. Что такое степень сухости пара?
6. Охарактеризуйте состояние водяного пара на нижней и верхней пограничных кривых.
7. Запишите пределы изменения степени сухости водяного пара.
8. Запишите формулы для определения энтальпии и энтропии влажного насыщенного пара.
9. Охарактеризуйте тройную точку воды.
10. Охарактеризуйте критическую точку воды.

## Лабораторная работа № 5

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

#### 5.1. Цель работы

Усвоение основ теории и метода расчета процесса теплопроводности, понятия о коэффициенте теплопроводности, экспериментального его определения и зависимости от физических параметров.

#### 5.2. Основные сведения

*Теплообмен* – необратимый самопроизвольный процесс переноса теплоты между телами с различной температурой или между участками одного тела также с различными температурами. В результате теплообмена происходит выравнивание температуры между телами или частями тел и при термодинамическом равновесии процесс теплообмена прекращается.

Процессы теплообмена многообразны, сложны и для удобства их разбирают на ряд более простых способов переноса теплоты: *теплопроводность, конвекцию, тепловое излучение*. Данный прием упрощает изучение простых способов переноса, так как каждый способ подчиняется своим законам.

В данной лабораторной работе рассматривают перенос теплоты за счет теплопроводности. *Теплопроводность* (кондукция) – теплоперенос между участками одного и того же тела или при непосредственном контакте тел с различной температурой, осуществляемый в результате движения (диффузии, соударений, колебаний) мельчайших частиц веществ – молекул, атомов, фононов и свободных электронов. Механизмы переноса теплоты за счет теплопроводности зависят от агрегатного состояния. В чистом виде теплопроводность наблюдается только в твердых телах. При глубоком вакууме ( $p, \text{Па} \rightarrow 0$ ) передача теплоты за счет теплопроводности отсутствует.

К количественным характеристикам теплообмена относятся:

*количество теплоты* – энергия, которую получает или теряет тело при теплопередаче. Количество теплоты является одной из

основных термодинамических величин и является функцией процесса, а не функцией состояния (обозначается  $Q$  [Дж]);

*тепловой поток* – количество теплоты, передаваемое в единицу времени  $\tau$  (обозначается  $\Phi$  [Дж/с = Вт]):

$$\Phi = \frac{Q}{\tau}; \quad (5.1)$$

*плотность теплового потока* – количество теплоты, проходящее в единицу времени ( $\tau$ ) через единицу площади поверхности ( $A$ ); или тепловой поток, проходящий через единицу площади поверхности (обозначается  $q$  [Вт/м<sup>2</sup>):

$$q_T = \frac{Q}{\tau \cdot A} = \frac{\Phi}{A}. \quad (5.2)$$

Перенос теплоты теплопроводностью зависит от распределения температуры по объему тела. Совокупность значений температуры во всех точках рассматриваемого объема в каждый фиксированный момент времени называется температурным полем. В декартовой системе координат

$$t = f(x, y, z, \tau). \quad (5.3)$$

Основная задача теории теплопроводности – определение зависимости (5.3).

При установившемся стационарном процессе теплообмена

$$t = f(x, y, z, \tau), \quad \frac{\partial t}{\partial \tau} = 0. \quad (5.5)$$

В двумерном температурном поле

$$t = f(x, y), \quad \frac{\partial t}{\partial z} = \frac{\partial t}{\partial \tau} = 0. \quad (5.6)$$

В одномерном

$$t = f(x), \quad \frac{\partial t}{\partial y} = \frac{\partial t}{\partial z} = \frac{\partial t}{\partial \tau} = 0. \quad (5.7)$$

Поверхность, образованная точками с одинаковой температурой, называется изотермической и характеризуется следующими свойствами: а) две изотермические поверхности, имеющие разные температуры, никогда не пересекаются; б) теплота не распространяется вдоль изотермической поверхности.

Согласно гипотезе Ж. Фурье, количество теплоты  $dQ$ , проходящее через элемент изотермической поверхности  $dA$  за промежуток времени  $d\tau$ , пропорционально температурному градиенту  $\frac{\partial t}{\partial n}$ :

$$q = -\lambda \text{grad}(t), \quad (5.8)$$

или в общем виде:

$$dQ = -\lambda dA d\tau \frac{dt}{dn}. \quad (5.9)$$

Знак минус указывает на то, что теплота передается в направлении уменьшения температуры.

Множитель  $\lambda$  называется коэффициентом теплопроводности.

Коэффициент теплопроводности является теплофизическим параметром, характеризующим способность тела проводить теплоту и численно равен отношению плотности теплового потока к единичному градиенту температуры, Вт/(м·К):

$$\lambda = \frac{|q|}{|\text{grad}t|}. \quad (5.10)$$

Величина коэффициента теплопроводности различных веществ зависит от их природы, агрегатного состояния и от основных термодинамических параметров – температуры и давления.

Коэффициент теплопроводности строительных и теплоизоляционных материалов, а также сельскохозяйственной продукции, являющихся по своей природе капиллярно-пористыми или коллоидно-капиллярно-пористыми телами, существенно зависит от плотности (пористости) и влажности. С увеличением пористости коэффициент теплопроводности уменьшается, т.к. поры материала заполняются газами или воздухом, теплопроводность которых значительно меньше твердых тел. Увлажнение материалов приводит к увеличению теплопроводности за счет вытеснения газовой фазы из пор более теплопроводной водой.

В тепловых расчетах коэффициент теплопроводности различных материалов, как правило, является справочной величиной. Данные о коэффициентах теплопроводности некоторых материалов приведены в приложении 2.

В элементарном объеме вещества при отсутствии внутренних источников теплоты за бесконечно малый промежуток времени теплопроводность описывается с помощью дифференциального уравнения следующего вида:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{c'} \left( \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) = a \nabla^2 t, \quad (5.11)$$

где  $\frac{\partial t}{\partial \tau}$  – скорость изменения температуры во времени;  $a = \frac{\lambda}{c'}$  – ко-

эффициент температуропроводности, характеризующий тепловую инерционность вещества и представляющий собой отношение коэффициента теплопроводности и объемной теплоемкости;  $\nabla^2$  – вектор в квадрате, характеризующий пространственное распределение температуры.

Для плоской стенки без внутренних источников теплоты в случае одномерного температурного поля дифференциальное уравнение будет иметь более простое аналитическое выражение

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}. \quad (5.12)$$

Частные особенности, однозначно определяющие единственный (конкретный) процесс теплообмена, содержащие теплофизические и геометрические характеристики тела и окружающей среды, начальные и граничные условия, а также интенсивность и закон распределения внутренних источников теплоты называются условиями однозначности или краевыми условиями.

Начальное условие определяется законом распределения температуры внутри тела в начальный момент времени при  $\tau = 0$ ,

$$t_o = f(x, y, z). \quad (5.13)$$

На практике во многих задачах принимают равномерное распределение температуры в начальный момент времени, поэтому  $T_o = \text{const}$ .

Граничные условия или условия на границах тела и окружающей среды задаются одним из известных четырех способов, два из которых относятся к задачам теплопроводности, а другие характеризуют остальные виды теплообмена – теплоотдачу, тепловое излучение, теплопередачу.

К граничным условиям задач теплопроводности относятся граничные условия I-го и IV-го родов.

Граничные условия I-го рода задаются распределением температуры по поверхности (стенкам) тела в любой момент времени

$$T_c = f(x, y, z, \tau). \quad (5.14)$$

В частном случае  $T_c = \text{const}$ .

Граничное условие II-го рода задается законом распределения плотности теплового потока по поверхностям (стенкам) тела в любой момент времени

$$q_c = f(x, y, z, \tau). \quad (5.15)$$

В частном случае  $q_c = \text{const}$ .

Это граничное условие соответствует теплообмену при нагревании тел тепловым излучением, например, в высокотемпературных печах.

Граничное условие III-го рода задается температурами поверхности тела и окружающей среды, а также законом теплоотдачи (закон Ньютона – Рихмана) между поверхностью тела и окружающей средой при турбулентном режиме движения среды

$$\alpha(t_c - t_{ж}) = -\lambda \left( \frac{dt}{dn} \right)_c, \quad (5.16)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи,  $t_c$  и  $t_{ж}$  – соответственно температуры стенки и окружающей среды (жидкости);  $\left( \frac{dt}{dn} \right)_c$  – градиент температуры на поверхности (стенке) тела.

Это граничное условие соответствует сложному теплообмену – теплопередаче, наиболее распространенному в технике и инженерной практике.

Граничное условие IV-го рода соответствует «чистой» теплопроводности-теплообмену поверхностей тела с ламинарным пограничным слоем окружающей среды или теплообмену идеально соприкасающихся тел при равенстве температур их поверхностей.

$$\lambda_1 \left( \frac{dt_1}{dn} \right)_c = \lambda_2 \left( \frac{dt_2}{dn} \right)_c. \quad (5.17)$$

Решение дифференциального уравнения теплопроводности при рассмотренных условиях однозначности позволяет определить сначала температурное поле в теле для любого момента времени, а затем энергетические характеристики, т.е. тепловую мощность, которые наиболее часто являются искомыми величинами в инженерной практике.

Тепловой поток передается теплопроводностью в условиях одномерного стационарного температурного поля, когда температура стенки зависит от одной координаты и не изменяется со временем (граничное условие I-го рода), рассчитывается на основании закона Фурье:

а) для однослойной стенки плоской

$$\Phi = \frac{\lambda}{\delta}(t_{c1} - t_{c2})A, \quad (5.18)$$

где  $\delta$  – толщина стенки;  $t_{c1}$  и  $t_{c2}$  – заданные температуры на наружных поверхностях;  $A$  – площадь поверхности теплообмена;

б) для однослойной цилиндрической стенки

$$\Phi = \frac{2\pi\lambda l(t_{c1} - t_{c2})}{\ln \frac{d_2}{d_1}}, \quad (5.18a)$$

где  $l$  – длина (высота) цилиндрической стенки;  $d_2$  и  $d_1$  – наружный и внутренний диаметры.

При анализе процессов теплообмена и в теплотехнических расчетах принято также использовать термическое сопротивление теплопроводности,  $\text{м}^2 \cdot \text{К} / \text{Вт}$ :

а) для плоской стенки

$$R_\lambda = \frac{\delta}{\lambda}; \quad (5.19)$$

б) для цилиндрической стенки

$$R_\lambda = \frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1}. \quad (5.19a)$$

Таким образом, тепловой поток (тепловая мощность) прямо пропорционален разности температур на поверхности стенки и обратно пропорционален термическому сопротивлению теплопроводности.

В общем случае при произвольной форме тела и заданном распределении температуры (или плотности теплового потока) на граничных поверхностях определение теплового потока температурного поля внутри тела является достаточно сложной теплотехнической задачей, которая не всегда решается аналитически

с помощью дифференциального уравнения. В этих условиях значительную помощь оказывает метод электротепловой аналогии.

Сравнения уравнения процессов теплопроводности и электропроводности, легко установить аналогию между этими явлениями:

а) уравнение теплопроводности плоской стенки

$$\Phi = \frac{t_{c1} - t_{c2}}{R_\lambda} A; \quad (5.20)$$

б) уравнение закона Ома

$$I = \frac{U_1 - U_2}{\rho_\Omega} S. \quad (5.20a)$$

Аналогия обеспечивается соответствующим выбором электрических величин и масштабов. При этом аналогом температуры  $t$  является электрический потенциал  $U$ , теплового потока  $\Phi$  – сила тока  $I$ , термического сопротивления  $R_\lambda$  – удельное электрическое сопротивление  $\rho_\Omega$ , площади теплообмена  $A$  – площадь поперечного сечения проводника  $S$ .

Для электротеплового моделирования используют электролитические ванны (трех- и двумерные модели), электропроводную бумагу (двухмерные модели) и сеточные модели, выполненные из радиотехнических резисторов и емкостей для исследования трехмерных нестационарных тепловых процессов.

### 5.3. Методика выполнения работы

При исследовании теплопроводности широко применяются методы стационарного теплового режима, основанные на теплопроводности плоской стенки (метод «плиты») и цилиндрической стенки (метод «трубы»).

Лабораторная установка по методу «трубы» (рис. 5.1) состоит из автотрансформатора 1, ваттметра 2, измерительного прибора 7 (милливольтметра или переносного потенциометра); цилиндрическо-

го слоя исследуемого материала – асбеста 3 и электронагревателя 4, который питается от электросети напряжением 220 В. Хромель-копелевые термодпары 5 через переключатель 6 подключены к прибору 7.

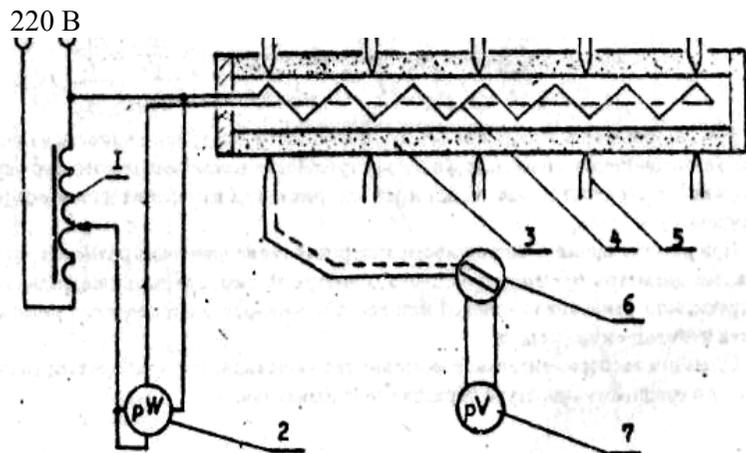


Рис. 5.1. Лабораторная установка

Работа выполняется в следующей последовательности.

Ознакомьтесь с лабораторной установкой и характеристиками используемых приборов.

По указанию преподавателя установить мощность электронагревателя.

Заготовить таблицу рекомендуемой формы для записи результатов измерения:

Время измерения, ч-мин	Тепловая мощность электронагревателя, Вт	Температура в точках измерения, °С																		
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10									

Измерять ЭДС всех десяти термодпар, при этом следить за показаниями ваттметра, поддерживая с помощью автотрансформатора постоянной мощность электронагревателя. Измерение термоЭДС производить поочередным подключением термодпар к измерительному прибору. При использовании милливольтметра с градуиров-

кой ХК выполнять отсчет температуры в точках измерения по шкале прибора.

После проведения 4-6 измерений с интервалом в 5 минут, когда станет очевидным наступление стационарного режима (значения температур изменяются незначительно в пределах приборной погрешности), показать преподавателю полученные данные.

По результатам последнего измерения, соответствующего стационарному режиму, определить температуры внутренней и наружной поверхностей. Температуру внутренней поверхности  $t_{c1}$  принять как среднее арифметическое из температур в первых пяти точках измерения, а температуру наружной поверхности  $t_{c2}$  как среднее арифметическое из температур в остальных точках измерения.

Рассчитать теплопроводность материала, Вт/(мК),

$$\lambda = \frac{\Phi \ln \frac{d_2}{d_1}}{2\pi(t_{c1} - t_{c2})l}, \quad (5.21)$$

где  $\Phi$  – тепловая мощность (тепловой поток) электронагревателя, Вт;  $d_2 = 100$  мм и  $d_1 = 60$  мм – наружный и внутренний диаметры, м;  $l = 1,5$  – длина цилиндрического теплоизоляционного слоя, м.

Рассчитать относительную погрешность эксперимента.

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\Delta\Phi}{\Phi} + \frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta t_{c1} - \Delta t_{c2}}{t_{c1} - t_{c2}} + \frac{\frac{\Delta d_1}{d_1} + \frac{\Delta d_2}{d_2}}{\ln \frac{d_2}{d_1}}, \quad (5.22)$$

где  $\Delta\Phi$  – погрешность измерения тепловой мощности, Вт;  $\Delta l$  – погрешность измерения длины теплоизоляционного слоя, м;  $\Delta t_{c1}$  и  $\Delta t_{c2}$  – погрешности измерения температур внутренней и наружной поверхностей слоя, °С;  $\Delta d_1$  и  $\Delta d_2$  – погрешности измерения диаметров (внутреннего и наружного), м.

При расчете принять погрешности измерения геометрических размеров равными для наружного диаметра 0,5 мм, внутреннего диаметра 0,1 мм, длины цилиндрического слоя 5 мм. Погрешности

измерения тепловой мощности и температур определить с учетом класса точности используемых средств.

Сравнить экспериментальное значение теплопроводности с табличным значением, взятым при средней температуре образца (по приложению 2).

### Контрольные вопросы

1. Перечислите и охарактеризуйте основные виды теплообмена.
2. Что такое теплопроводность и каковы ее особенности в зависимости от природы материала?
3. Запишите уравнение Фурье – основное уравнение теплопроводности.
4. Что называется градиентом температуры?
5. Дайте определение коэффициента теплопроводности.
6. Укажите факторы, от которых зависит коэффициент теплопроводности.
7. Охарактеризуйте особенности расчета теплопроводности плоской стенки.
8. Охарактеризуйте особенности расчета теплопроводности цилиндрической стенки.
9. Что называется термическим сопротивлением теплопроводности?
10. Дайте определение плотности теплового потока.

## Лабораторная работа № 6

### ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОТДАЧИ ПРИ СВОБОДНОМ И ВЫНУЖДЕННОМ ДВИЖЕНИЯХ ВОЗДУХА

#### 6.1. Цель работы

Усвоение основ теории конвективного теплообмена и теплоотдачи, сходства и различия этих видов теплообмена, описания их с помощью теории подобия и физической сущности коэффициента теплоотдачи. Научиться измерять коэффициент теплоотдачи и рассчитывать его, используя теорию подобия.

#### 6.2. Основные сведения

В газообразной и жидкой средах с неоднородным распределением температуры благодаря некоторым их физическим свойствам (таким, как слабое взаимодействие между молекулами, текучесть и др.) всегда возникает макроскопическое перемещение элементов среды, сопровождающееся переносом теплоты. Наряду с названным в указанной системе имеет место также теплоперенос на молекулярном уровне посредством теплового движения микрочастиц. Теплообмен, обусловленный макро- и микродвижением в жидкой или газообразной среде с неоднородным распределением температуры, называется *конвективным теплообменом*. Наиболее распространенным случаем конвективного теплообмена является теплообмен между поверхностью тела и движущейся средой при их непосредственном соприкосновении, называемый *теплоотдачей*. Таким образом, конвективный теплообмен сопровождается перемещением среды, что усложняет явление. У поверхности тела образуется слой заторможенной жидкости или газа (пограничный слой), который как бы отделяет среду от поверхности, затрудняя тем самым теплообмен между ними. В целом явление получается очень сложным, зависящим от ряда факторов.

Так как конвективный теплообмен сопровождается переносом среды, важную роль приобретает характер ее движения и режим течения.

По природе возникновения различают два вида движения жидкости – свободное и вынужденное. *Свободным* называется движение, происходящее вследствие разности плотностей среды в гравитационном поле. При теплообмене причиной неодинаковой плотности среды является неоднородное распределение температуры. Интенсивность свободного движения зависит от физических свойств жидкости, разности температур, размера тела и объема пространства, в котором протекает процесс. *Вынужденным* называется движение, возникающее под действием внешних побудителей (насосы, вентиляторы, перемешивающие устройства и пр.). В общем случае наряду с вынужденным может одновременно развиваться и свободное движение. Режим течения жидкости может быть ламинарным (спокойное, струйчатое течение) и турбулентным (неупорядоченное, вихревое течение). В общем случае режим течения определяется величиной числа Рейнольдса – Re: ламинарный режим –  $Re < 2300$ ; переходная зона (режим) –  $2300 \leq Re \leq 10000$ ; турбулентный –  $Re > 10000$ .

При ламинарном режиме перенос теплоты в направлении нормали к стенке осуществляется в основном теплопроводностью. А так как для жидкостей и газов коэффициент теплопроводности имеет малую величину, теплоперенос будет затруднен.

При турбулентном режиме такой способ переноса теплоты сохраняется лишь в вязком подслое, образующемся у поверхности тела при любой степени турбулизации потока, а внутри турбулентного ядра перенос осуществляется путем интенсивного перемешивания жидкости. В этих условиях интенсивность теплоотдачи в основном определяется термическим сопротивлением пристенного подслоя.

Расчет конвективного теплообмена (теплоотдачи) производится с использованием закона Ньютона – Рихмана

$$\Phi = \alpha(t_C - t_{\text{ж}})A, \quad (6.1)$$

или

$$q = \alpha(t_C - t_{\text{ж}}), \quad (6.1a)$$

где  $A$  – площадь поверхности, сквозь которую происходит передача теплоты,  $\text{м}^2$ ;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;  $t_C$  – температура нагревающего тела (поверхности),  $^{\circ}\text{C}$ ;  $t_{\text{ж}}$  – температура нагреваемого тела (среды),  $^{\circ}\text{C}$ .

Плотность теплового потока пропорциональна разности температур между поверхностью тела и окружающей средой – жидкостью (капельной или газообразной), омывающей данное тело.

Коэффициент теплоотдачи (теплообмена) характеризует интенсивность конвективного теплообмена и равен отношению плотности теплового потока к единичному температурному напору – разности температур поверхности тела и среды в один кельвин или градус Цельсия.

В уравнении (6.1) выделена и показана первопричина теплообмена – разность температур, а вся сложность его заключена в определении коэффициента теплоотдачи.

Коэффициент теплоотдачи зависит от ряда факторов:

- а) особенностей движения среды (скорость и режим движения);
- б) физических свойств среды (теплопроводность, вязкость, плотность, температура, давление);
- в) формы, геометрических размеров и расположения в пространстве твердого тела;
- г) направления теплового потока (от поверхности к среде или от среды к поверхности).

Ориентировочные значения коэффициентов теплоотдачи приведены в приложении 4.

Коэффициент теплоотдачи является основной характеристикой конвективного теплообмена и теплоотдачи. Его величина для инженерных расчетов тепловой мощности может быть выбрана с помощью справочной литературы, получена экспериментально или расчетным путем на основании теории подобия.

Теория подобия устанавливает необходимые и достаточные условия, при которых физические явления подобны и результаты экспериментальных исследований, проведенные на моделях, можно распространить на реальные объекты.

В теории подобия размерные величины, характеризующие физические явление, объединяют в безразмерные комплексы – числа подобия или критерии.

Числа подобия, составленные из величин, входящих в условия однозначности, и не содержащие искомым величин, называются *определяющими*.

Числа подобия, содержащие искомые величины, называются *определяемыми*.

Основу теории подобия составляют три теоремы:

I-я теорема (И. Ньютон, 1636 г. и Ж. Бертран, 1848 г.)

«У подобных явлений одноименные числа подобия равны»;

II-я теорема (А. Федерман, 1911 г. и Е. Букингем, 1914 г.)

«Систему дифференциальных уравнений, описывающих подобные явления, можно представить в виде критериальных уравнений, которые связывают между собой определяющие и определяемые числа подобия данных явлений»;

III-я теорема (А. Гухман и М. Кирпичев, 1933 г.)

«Подобны те явления, условия однозначности которых подобны и определяющие числа подобия равны».

Для теплового подобия теплоотдачи (конвективного теплообмена) необходимо соблюдать подобие температурных полей и тепловых потоков, а также обеспечить гидродинамическое подобие.

Гидродинамическое подобие складывается из геометрического, кинематического и динамического подобий.

Главным числом гидродинамического подобия является число Ньютона, которое устанавливает соотношение между главной силой ( $F$ ), действующей в потоке, и силой инерции:

$$Ne = \frac{F}{ma_y} = \frac{F}{\rho\omega^2 A}, \quad (6.2)$$

где  $m$  – масса жидкости;  $a_y$  – ускорение движения жидкости;  $\rho$  – плотность жидкости;  $\omega$  – скорость движения жидкости;  $A$  – площадь поверхности.

Если в потоке главной силой является сила тяжести, то используя (6.2) получаем число Фруда, устанавливающее соотношение между силами инерции и тяжести:

$$Fr = \frac{\omega^2}{gl}, \quad (6.3)$$

где  $l$  – высота столба жидкости.

Число Эйлера является определяемым числом гидродинамического подобия и устанавливает соотношение между силами давления и инерции. Из (6.2) имеем

$$Eu = \frac{\Delta p}{\rho\omega^2}. \quad (6.4)$$

Основным числом, характеризующим гидродинамическое подобие при свободном (безнапорном) движении жидкости, является число Грасгофа.

Число Грасгофа численно равно отношению подъемной силы (силы Архимеда) к силе вязкости, препятствующей подъему нагретых частиц среды (жидкости):

$$Gr = \frac{\beta g l_o^3 \Delta t}{\nu}, \quad (6.5)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения;  $\beta$  – коэффициент объемного расширения;  $\Delta t = t_c - t_{ж}$  – разность температур между стенкой (поверхностью) и жидкостью (средой);  $l$  – определяющий размер;  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости среды.

Основным числом, характеризующим гидродинамическое подобие при вынужденном (напорном) движении жидкости, является число Рейнольдса.

Число Рейнольдса численно равно отношению сил инерции к силам вязкости:

$$Re = \frac{\omega l_o}{\nu}. \quad (6.6)$$

Величина числа Рейнольдса позволяет определить режим движения жидкости. При больших силах вязкости и соответственно сравнительно малых числах Рейнольдса наблюдается ламинарный режим. Если силы вязкости значительно меньше сил инерции, то в потоке имеет место развитый турбулентный режим ( $Re > 10000$ ).

Главным числом теплового подобия конвективного теплообмена и теплоотдачи является число Нуссельта

$$Nu = \frac{\alpha l}{\lambda} = \frac{R_\lambda}{R_\alpha}. \quad (6.7)$$

Число Нуссельта устанавливает соотношение между интенсивностью теплопроводности и теплоотдачи в пограничном слое и потоке и численно равно отношению термического сопротивления теплопроводности и термическому сопротивлению теплоотдачи в пограничном слое и потоке.

К числам теплового подобия относится также число Пекле, характеризующее соотношение кондуктивного и конвективного теплопереноса в потоке.

$$Pe = Re Pr = \frac{\omega l_0}{a}, \quad (6.8)$$

где  $a$  – коэффициент температуропроводности ( $a = \frac{\lambda}{c_p \rho}$ ).

В инженерной практике наибольшее распространение по сравнению с числом Пекле получило число Прандтля:

$$Pr = \frac{Pe}{Re} = \frac{\nu}{a} = \frac{\mu \cdot c_p}{\lambda}. \quad (6.9)$$

Число Прандтля характеризует физические свойства среды и способность распространения теплоты в ней.

Величина числа Прандтля капельных жидкостей существенно зависит от температуры, при увеличении которой  $Pr$  резко уменьшается, так как наиболее сильно изменяется (уменьшается) вязкость ( $\mu$ ) данных жидкостей. Вязкость является определяющей для  $Pr$  по сравнению с ( $\lambda$  и  $c_p$ ).

Число Прандтля газов (воздуха) практически не зависит от температуры и давления, и определяется по величине атомности газа.

Таким образом, теплоотдача характеризуется шестью числами подобия – Нуссельта ( $Nu$ ), Эйлера ( $Eu$ ), Грасгофа ( $Gr$ ), Рейнольдса ( $Re$ ), Прандтля ( $Pr$ ) или Пекле ( $Pe$ ).

Числа подобия Нуссельта (6.7) и Эйлера (6.4) содержат искомые величины соответственно  $\alpha$  и  $\Delta P$ , поэтому являются определяемыми числами подобия. Остальные числа подобия являются определяющими.

Уравнения, составленные из чисел подобия, называются *критериальными уравнениями подобия*.

Для расчета теплоотдачи при свободной конвекции (нагрев или охлаждение среды) критериальное уравнение имеет следующий вид:

$$Nu = C(Gr Pr)^n \left( \frac{Pr_{ж}}{Pr_c} \right)^{0,25}, \quad (6.10)$$

где  $C$  и  $n$  – постоянные числа, которые находятся опытным путем и зависят от характера движения жидкости (представлены в справочной литературе).

Для расчета теплоотдачи при вынужденной конвекции имеем следующее критериальное уравнение подобия:

$$Nu = C(Re^m Pr^n) \left( \frac{Pr_{ж}}{Pr_c} \right)^{0,25}, \quad (6.11)$$

где  $C$ ,  $m$  и  $n$  – коэффициенты, зависящие от вида обтекания и поверхности, находятся опытным путем (представлены в справочной литературе).

Число  $Pr$  для газов слабо зависит от температуры, поэтому для воздуха  $\left( \frac{Pr_{ж}}{Pr_c} \right)^{0,25} = 1$ .

Например, при поперечном обтекании одиночной трубы набегающим потоком критериальное уравнение подобия для расчета теплоотдачи при вынужденной или смешанной конвекции имеет следующий окончательный вид

$$Nu = (0,43 + C Re^n Pr^{0,38}) \epsilon_\varphi, \quad (6.12)$$

где  $\epsilon_\varphi$  учитывает расположение трубы относительно потока. При перпендикулярной ориентации  $\epsilon_\varphi = 1$ . Определяющим размером является наружный диаметр трубы. Значения коэффициентов  $C$  и  $n$  выбираются в зависимости от числа Рейнольдса.

### 6.3. Методика выполнения работы при свободном движении воздуха

В настоящей работе исследуется коэффициент теплоотдачи горизонтальной трубы при свободной конвекции воздуха в зависимости от разности температур поверхности нагретой трубы и окружающего воздуха. При этом используется метод стационарного теплового режима.

Лабораторная установка (рис. 6.1) расположена в аудитории, размеры которой значительно больше размеров теплоотдающей поверхности трубы. В таких случаях принято говорить о свободной конвекции в условиях неограниченного пространства.

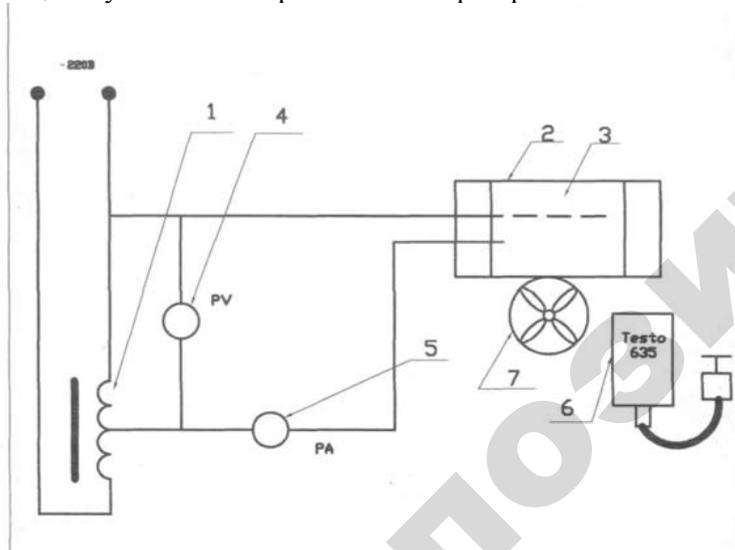


Рис. 6.1. Схема лабораторной установки

1 – автотрансформатор; 2 – труба; 3 – электронагреватель; 4 – вольтметр;  
5 – амперметр; 6 – измерительный прибор testo-635; 7 – вентилятор

Опытная установка для определения коэффициента теплоотдачи состоит из стальной трубы диаметром 55,5 мм и длиной 502 мм. Внутри трубы находится электрический нагреватель, который равномерно выделяет тепло по всей ее длине. Количество тепла, затрачиваемое на нагрев трубы, определяется по электрической мощности, потребляемой нагревателем и измеряемой амперметром 5 и вольтметром 4. Для измерения температуры неизолированной поверхности трубы и изолированных участков применяется универсальный измерительный прибор testo-635.

Прибор testo-635 состоит из корпуса, на котором расположены дисплей и клавиши управления.

Работа выполняется в следующей последовательности.

По указанию преподавателя установить мощность электронагревателя.

Заготовить таблицу рекомендуемой формы для записи результатов измерения.

Время измерения, ч-мин	Тепловая мощность электронагревателя, Вт	Температура поверхности трубы, °C					$t_B$ , °C
		1	2	3	4	5	

Привести в рабочее состояние прибор testo-635 (рис. 6.2).

Для определения температуры на поверхности трубы к прибору присоединяется зонд.

Зонд температуры соединяется с прибором кабелем с помощью разъемов 6. При подключении зонда следует соблюдать полярность.

Зонд позволяет измерять температуру поверхности в диапазоне от -50 до +1000 °C с погрешностью  $\pm 1$  °C.

Порядок работы с прибором testo-635:

1. Подключить к прибору измерительный зонд.
2. Включить прибор нажатием клавиши «I/O». После короткого самотеста на индикаторе прибор готов к работе.

3. При нажатии клавиши «T1/T2/td» на экране высвечиваются два значения и стрелкой показывается, какая величина измерена: верхняя цифра соответствует относительной влажности  $\varphi$ , %, а нижняя – температуре T1, °C. Высвечивание символа «Wat» на экране свидетельствует об окончании ресурса элементов питания.

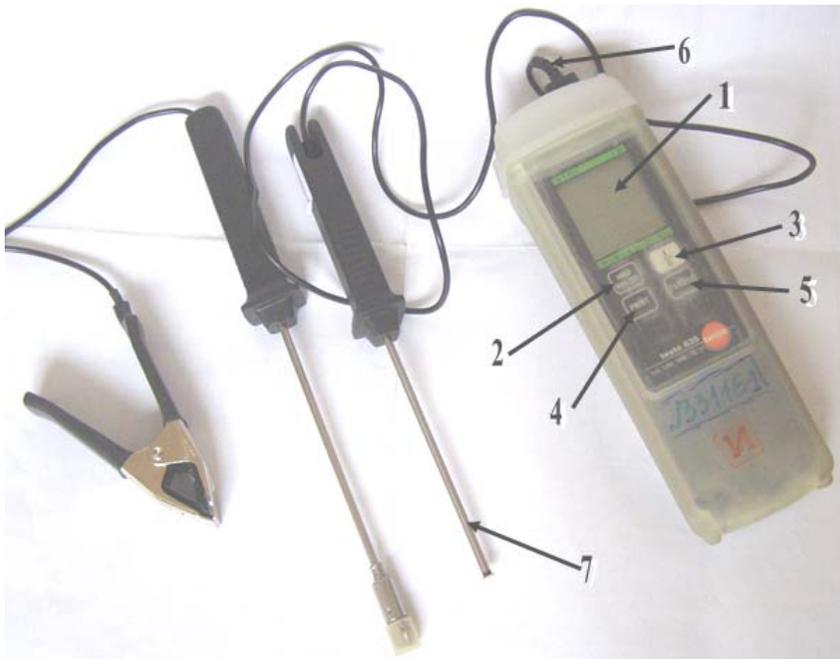


Рис. 6.2. Внешний вид прибора testo-635:

1 – дисплей; 2 – клавиша режимов работы «Hold/max/min»; 3 – клавиша включения прибора «I/O»; 4 – клавиша печати «Print»; 5 – клавиша режимов работы «T1/T2/td»; 6 – разъемы для подключения зондов; 7 – измерительный зонд

Прибором произвести измерение температуры теплоотдающей поверхности (трубы) в пяти точках. Жидкостным термометром, расположенным в аудитории, измерить температуру окружающего воздуха  $t_B$ .

По данным последнего измерения, соответствующего стационарному режиму, определить температуру теплоотдающей поверхности  $t_C$ , °C, принимая ее равной среднему арифметическому из температур в точках измерения, а также температуру воздуха.

Теплообмен поверхности трубы с окружающей средой и другими телами является сложным и происходит в результате теплоотдачи и лучистого теплообмена. Поэтому необходимо учесть теплообмен излучением между трубой и другими телами, предметами в соответствии с уравнением Стефана – Больцмана:

$$\Phi_{\text{л}} = \varphi_{1,2} \varepsilon_{\text{п}} C_0 A \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right], \quad (6.13)$$

где  $\Phi_{\text{л}}$  – лучистый тепловой поток, Вт;  $\varphi_{1,2}$  – угловой коэффициент излучения, учитывает часть теплового излучения первого тела, которая воспринимается вторым;  $\varepsilon_{\text{п}}$  – приведенный коэффициент теплового излучения;  $C_0$  – излучательная способность абсолютно черного тела, Вт/(м<sup>2</sup> · К<sup>4</sup>);  $T_1$  и  $T_2$  – термодинамические температуры тел, К;  $A$  – площадь поверхности теплообмена, м<sup>2</sup>.

При расчете принять:

- угловой коэффициент излучения  $\varphi_{1,2} = 1$ ;
- приведенный коэффициент теплового излучения равный коэффициенту теплового излучения трубы  $\varepsilon_{\text{п}} = 0,45$ ;
- излучательную способность абсолютно черного тела  $C_0 = 5,67$  Вт/(м<sup>2</sup> · К<sup>4</sup>);
- площадь поверхности теплообмена как площадь цилиндрической поверхности трубы;
- $T_1$  и  $T_2$  соответственно термодинамические температуры теплоотдающей поверхности и воздуха в лаборатории, К.

Тепловой поток при конвективном теплообмене на поверхности трубы, Вт,

$$\Phi_{\text{к}} = \Phi - \Phi_{\text{л}}, \quad (6.14)$$

где  $\Phi$  – тепловая мощность электронагревателя, Вт.

Коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup> · К),

$$\alpha = \frac{\Phi_{\text{к}}}{A(t_C - t_B)}. \quad (6.15)$$

Относительная погрешность эксперимента

$$\frac{\Delta \alpha}{\alpha} = \frac{\Delta \Phi}{\Phi_{\text{к}}} + \frac{\Delta t_C + \Delta t_B}{t_C - t_B} + \frac{\Delta l}{l_0} + \frac{\Delta d}{d}, \quad (6.16)$$

где  $\Delta\Phi$  – погрешность измерения теплового потока, Вт;  $\Delta t_c$  и  $\Delta t_b$  – погрешности измерения температур поверхности трубы и воздуха, °С;  $\Delta l$  и  $\Delta d$  – погрешности измерения длины и диаметра трубы, мм;  $l_0$  и  $d$  – длина и диаметр трубы, мм.

Погрешности измерения теплового потока и температур рассчитывать с учетом погрешностей средств измерения, используя класс точности приборов.

При расчете принять погрешности измерения диаметров трубы  $\pm 0,2$  мм и ее длины 1 мм.

#### 6.4. Научно-исследовательская часть работы

По указанию преподавателя выполняется учебно-исследовательская работа, которая состоит в использовании теории подобия для обобщения экспериментальных данных. При этом необходимо провести эксперимент при разных температурах теплоотдающей поверхности, что достигается изменениями мощности электронагревателя.

Обобщение экспериментальных данных проводится в виде зависимости между числами подобия.

$$Nu = C(GrPr)^n. \quad (6.17)$$

Причем в качестве определяющих размеров используются диаметр трубы и температура воздуха в аудитории.

Задача заключается в определении показателя степени  $n$  и постоянного коэффициента  $C$ .

По результатам эксперимента рассчитывают числа Нуссельта и произведения чисел Прандтля и Грасгофа. Представленные в таком виде данные изображаются в логарифмической системе координат, приняв по осям один и тот же масштаб.

График, определяющий функциональную зависимость в логарифмических координатах, является прямой линией, наиболее приближающейся к опытным точкам. Тангенс угла наклона этой линии равен показателю степени, а постоянный коэффициент определяют по данным для любой точки линии:

$$C = \frac{Nu}{(GrPr)^n}. \quad (6.18)$$

При более точном определении показателя степени и постоянного коэффициента используется метод наименьших квадратов.

#### 6.5. Методика выполнения работы при вынужденном движении воздуха

Обдув воздухом теплоотдающей поверхности одиночной трубы осуществляется с помощью двух осевых вентиляторов, расположенных от трубы на расстоянии 10 см.

Работу выполняют в той же последовательности, что и в разделе 6.3. Дополнительно измеряется скорость воздуха с помощью анемометра ИС-16 или принимается равной 3,5 м/с.

При обработке экспериментальных данных используются уравнения (6.13) и (6.14) для расчета теплового излучения и теплового потока при вынужденной конвекции. По формуле (6.15) рассчитывают экспериментальное значение коэффициента теплоотдачи, а затем определяют погрешность эксперимента по выражению (6.16).

#### 6.6. Определение коэффициента теплоотдачи по критериальным уравнениям

Экспериментально найденное значение коэффициента теплоотдачи сравнить с расчетным по критериальному уравнению подобия

$$Nu = 0,5(GrPr)^{0,25}, \quad (6.19)$$

где  $Nu$ ,  $Gr$ ,  $Pr$  – числа подобия Нуссельта, Грасгофа и Прандтля.

За определяющую температуру принята температура среды в пограничном слое на цилиндрической поверхности  $t_{пс} = \frac{t_c + t_b}{2}$ ,

а за определяющий размер – диаметр трубы.

Уравнение (6.17) применяют в условиях свободного ламинарного движения около горизонтальных труб, при  $10^3 < GrPr < 10^8$ .

Число Грасгофа

$$Gr = \frac{gl^3}{\nu^2} \beta \Delta t, \quad (6.20)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения,  $\text{м/с}^2$ ;  $l$  – определяющий размер (в рассматриваемых условиях наружный диаметр трубы),  $\text{м}$ ;  $\beta$  – коэффициент объемного расширения,  $\text{К}^{-1}$ ;  $\Delta t$  – разность температур стенки и окружающей среды,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\nu$  – кинематическая вязкость,  $\text{м}^2/\text{с}$ .

Число Прандтля и теплофизические свойства воздуха принимают по приложению 3 при определяющей температуре.

Расчетное значение коэффициента теплоотдачи,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ,

$$\alpha_p = Nu \frac{\lambda}{l}, \quad (6.21)$$

где  $\lambda$  – теплопроводность среды (определяют по приложению 3 при определяющей температуре),  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ .

При сравнении экспериментально полученного значения коэффициента теплоотдачи при вынужденном движении воздуха с рассчитанным по теории подобия используют критериальное уравнение

$$Nu = 0,22 Re^{0,6} Pr^{0,33}, \quad (6.22)$$

где  $Re$  – число Рейнольдса.

$$Re = \frac{gl}{\nu}, \quad (6.23)$$

где  $\nu$  – скорость набегающего потока воздуха,  $\text{м/с}$ .

В качестве определяющей температуры использована температура воздуха  $t_b$  в набегающем потоке воздуха.

Расчетное значение коэффициента теплоотдачи определяют по формуле (6.21).

Полученные значения коэффициентов теплоотдачи сравнить со справочными по приложению 4.

## Контрольные вопросы

1. Охарактеризуйте теплоотдачу и конвективный теплообмен и их взаимосвязь с особенностями движения среды.
2. Запишите уравнение теплоотдачи Ньютона – Рихмана.
3. Приведите определение коэффициента теплоотдачи.
4. Перечислите факторы, от которых зависит коэффициент теплоотдачи.
5. Сформулируйте теоремы подобия.
6. Перечислите числа подобия, характеризующие теплообмен в условиях свободной конвекции, укажите их физический смысл.
7. Приведите числа подобия теплоотдачи при вынужденной конвекции, укажите их физический смысл.
8. Запишите критериальные уравнения подобия.
9. В каком случае коэффициент теплоотдачи будет больше – при свободной конвекции или вынужденной?

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ В ТЕПЛООБМЕННОМ АППАРАТЕ

### 7.1. Цель работы

Усвоение основ теории о классификации и расчета теплообменных аппаратов, механизма сложного процесса теплообмена – теплопередачи, схем движения теплоносителей, расчета процесса теплопередачи, тепловой мощности и коэффициента теплопередачи.

### 7.2. Основные сведения

*Теплопередачей* называется сложный теплообмен между движущимися жидкостями или газами (теплоносителями) через разделяющую их стенку. Теплопередача складывается, как правило, из всех трех основных способов или видов теплообмена, протекающих одновременно.

Расчетное уравнение теплопередачи через плоскую стенку записывается в виде

$$q = k(t_{ж1} - t_{ж2}), \quad (7.1)$$

или

$$\Phi = k(t_{ж1} - t_{ж2})A, \quad (7.1a)$$

где  $k$  – коэффициент теплопередачи;  $t_{ж1}$  и  $t_{ж2}$  – температуры сред, между которыми происходит теплообмен.

Коэффициент теплопередачи характеризует интенсивность теплообмена и равен отношению поверхностной плотности теплового потока к температурному напору – разности температур сред в один градус или Кельвин. При теплопередаче через плоскую многослойную стенку он определяется следующим образом:

$$k = \frac{1}{R_o}. \quad (7.2)$$

Величина, обратная коэффициенту теплопередачи, называется термическим сопротивлением теплопередачи:

$$R_o = \frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}. \quad (7.2a)$$

Термическое сопротивление теплопередачи является важнейшей теплотехнической характеристикой, например, наружных ограждающих конструкций помещений – стен, перекрытий, остекления, дверей и т.д.

Теплопередача через тонкие цилиндрические стенки может быть рассчитана по уравнениям (7.1) и (7.2). При этом площадь поверхности теплообмена определяется с использованием среднего диаметра стенки.

*Теплообменными аппаратами* называются теплотехнические устройства для организации теплообмена между жидкостями или газами. В них применяются теплоносители: горячий (греющий) и холодный. *Теплоносителями* называются движущиеся среды, участвующие в теплообмене или используемые для организации теплообмена в теплообменнике. В качестве горячего теплоносителя применяют водяной пар, горячую воду, газообразные продукты сгорания топлива, а также расплавленные соли и металлы, минеральные масла и органические соединения.

Наибольшее распространение в технике и сельскохозяйственном производстве получили рекуперативные теплообменные аппараты, в которых основным теплообменом является теплопередача.

Примером рекуперативных теплообменников являются нагревательные приборы в системах отопления, калориферы в системах воздушного отопления и вентиляции, водонагреватели в системах горячего водоснабжения, радиаторы и картеры в системах охлаждения двигателей внутреннего сгорания, конденсаторы в паросиловых установках, испарители и конденсаторы в холодильных установках, пастеризаторы молока, воздухоподогреватели, водяные экономайзеры и пароперегреватели в котельных установках и т.п.

Расчет теплообменных аппаратов может быть конструкторским, целью которого является определение площади поверхности теплообмена и других конструктивных размеров, и поверочным, в результате которого определяются тепловая мощность теплообменного аппарата и конечные температуры теплоносителей. В основу расчета положены уравнения теплового баланса и теплопередачи.

Уравнение теплового баланса составляется из расчета на единицу времени, в нем учитываются тепловые потоки между теплоносителями и через наружную поверхность теплообменного аппарата в окружающую среду. Для уменьшения тепловых потерь используется тепловая изоляция теплообменного аппарата.

При отсутствии изменения агрегатного состояния теплоносителей имеются соответственно для горячего и холодного теплоносителей следующие уравнения теплового баланса:

$$\Phi_1 = c_{p1} m_{t1} (t'_1 - t''_1) \eta = W_1 (t''_2 - t'_2), \quad (7.3)$$

$$\Phi = c_{p2} m_{t2} (t''_2 - t'_2) = W_2 (t''_2 - t'_2), \quad (7.3a)$$

$$\eta = \frac{\Phi_2}{\Phi_1}, \quad (7.4)$$

где  $\Phi$  – тепловая мощность теплообменного аппарата;  $c_{p1}$ ,  $c_{p2}$  – удельные изобарные теплоемкости теплоносителей;  $m_{t1}$ ,  $m_{t2}$  – массовые расходы теплоносителей;  $t'_1$ ,  $t'_2$  – температуры теплоносителей на входе в теплообменный аппарат;  $t''_1$ ,  $t''_2$  – температуры теплоносителей на выходе из теплообменного аппарата;  $\eta$  – коэффициент, учитывающий тепловые потери теплообменного аппарата в окружающую среду (принимается в пределах 0,95–0,98);  $W_1$  и  $W_2$  – водяные (тепловые) эквиваленты теплоносителей.

Для теплообменников с изменением агрегатного состояния горячего теплоносителя (водяного пара)

$$\Phi = m_{t1} (h_{п} - h_{к}) \eta = c_{p2} m_{t2} (t''_2 - t'_2), \quad (7.5)$$

где  $h_{п}$ ,  $h_{к}$  – удельные энтальпии теплоносителя на входе и на выходе из теплообменного аппарата.

В уравнениях (7.3) и (7.3a) индекс «1» использован для обозначения греющего теплоносителя, а индекс «2» – для обозначения холодного (нагреваемого) теплоносителя. Во многих случаях пренебрегают тепловыми потерями в окружающую среду и принимают  $\eta = 1$ .

Уравнение теплопередачи записывается для плоской стенки, что является оправданным в случае тонких цилиндрических стенок небольшой толщины.

$$\Phi = kA\Delta t_{cp}, \quad (7.6)$$

где  $k$  – коэффициент теплопередачи;  $\Delta t_{cp}$  – средний температурный напор (усредненная по поверхности теплообмена разность температур горячего и холодного теплоносителей);  $A$  – площадь поверхности теплообмена.

Средний температурный напор определяется изменением температуры теплоносителей по мере их движения в теплообменнике и зависит от схемы движения теплоносителей и их водяных эквивалентов.

Различают следующие схемы движения теплоносителей:

а) прямоток, характерной особенностью которого является движение теплоносителей в одном направлении и параллельно друг другу;

б) противоток, при котором движение теплоносителей происходит параллельно и навстречу друг другу;

в) перекрестный ток, который характеризуется движением теплоносителей в перпендикулярном направлении;

г) комбинированные (смешанные), включающие в себя элементы вышеперечисленных схем.

Наиболее простыми являются прямоточные и противоточные схемы, для которых типичными являются следующие температурные графики (рис. 7.1).

Средний температурный напор рассчитывается следующим образом:

$$\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_{\bar{6}} - \Delta t_{\bar{м}}}{\ln \frac{\Delta t_{\bar{6}}}{\Delta t_{\bar{м}}}}, \quad (7.7)$$

где  $\Delta t_6$ ,  $\Delta t_M$  – большая и меньшая разности температур теплоносителей на входе и выходе из теплообменного аппарата.

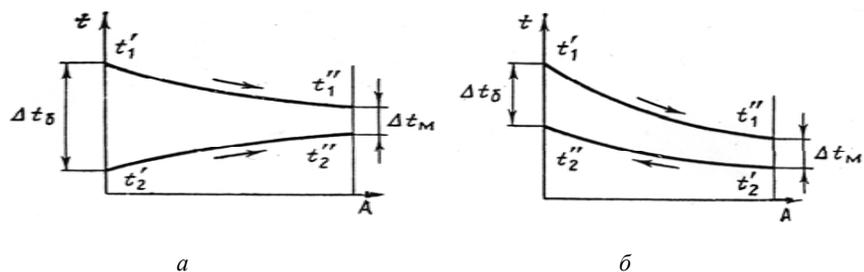


Рис. 7.1. Температурные графики:  
а – прямоток; б – противоток

При  $\frac{\Delta t_6}{\Delta t_M} < 1,7$  допускается расчет по формуле  $\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_6 + \Delta t_M}{2}$ .

Температурный напор вдоль поверхности теплообмена изменяется значительно при прямотоке, чем при противотоке. Противоточная схема движения теплоносителей обеспечивает, как правило, больший средний температурный напор и, следовательно, большую тепловую мощность теплообменника. Поэтому обычно рекомендуется использовать противоточные схемы. При этом следует учитывать, что при противотоке поверхность теплообмена находится в более напряженных температурных условиях, чем при прямотоке.

### 7.3. Методика выполнения работы

Лабораторная работа (рис. 7.2) включает в себя теплообменный аппарат 2 рекуперативного типа «труба в трубе», в котором по внутренней трубе движется горячая вода, а по кольцевому зазору между внутренней трубой и наружной – нагреваемая вода. Для получения горячего теплоносителя (горячей воды) используется электроводонагреватель 3.

При выполнении работы необходимо подать в теплообменный аппарат холодную воду.

Заготовить таблицу рекомендуемой формы для записи результатов измерения.

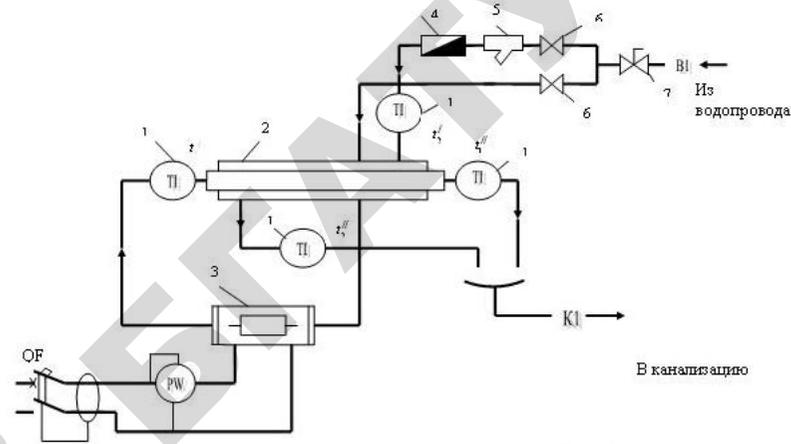


Схема лабораторной установки:  
1 – термометр; 2 – теплообменный аппарат; 3 – электроводонагреватель;  
4 – водомер; 5 – сетчатый фильтр; 6 – вентиль; 7 – шаровый кран;  
QF – дифференциальный автоматический выключатель; PW – ваттметр.

Рис. 7.2. Схема лабораторной установки

Время измерения, ч-мин	Температура, °С				Схема движения теплоносителей
	$t'_1$	$t''_1$	$t'_2$	$t''_2$	

Через каждые 3 минуты измерять температуры теплоносителей одновременно на входе и выходе теплообменника до наступления стационарного теплового режима.

По показаниям термометров определить схему движения теплоносителей в теплообменнике (прямоток или противоток).

Показать полученные результаты преподавателю и по его указанию приступить к обработке результатов.

Рассчитать тепловую мощность теплообменного аппарата, Вт,

$$\Phi = c_B m_{t_2} (t''_2 - t'_2), \quad (7.8)$$

где  $c_B$  – удельная изобарная теплоемкость воды, принять равной 4 200 Дж/(кг · К);  $t''_2$  и  $t'_2$  – температуры нагреваемой воды на выходе из теплообменного аппарата и на входе, °С;  $m_{t_2}$  – массовый расход нагреваемой воды, принять равным 0,009 кг/с.

Рассчитать тепловой поток, отдаваемый горячей водой, Вт,

$$\Phi_1 = c_B m_{t_1} (t'_1 - t''_1), \quad (7.9)$$

где  $m_{t_1}$  – массовый расход горячей воды, принять равным 0,025 кг/с;  $t'_1$  и  $t''_1$  – температуры горячей воды на входе и выходе теплообменного аппарата, °С.

Рассчитанное значение сравнить с тепловой мощностью аппарата и указать возможные причины их различия.

Построить графики изменения температур теплоносителей для стационарного режима (без масштаба) и определить температурные напоры на концах теплообменного аппарата (на входе и на выходе).

Вычислить средний температурный напор

$$\Delta t_{CP} = \frac{\Delta t_B - \Delta t_M}{\ln \frac{\Delta t_B}{\Delta t_M}}, \quad (7.10)$$

где  $\Delta t_B$ ,  $\Delta t_M$  – большая и меньшая разности температур теплоносителей на входе и выходе из теплообменного аппарата, °С.

При  $\frac{\Delta t_B}{\Delta t_M} < 1,7$  допускается расчет по формуле

$$\Delta t_{CP} = \frac{\Delta t_B + \Delta t_M}{2}. \quad (7.11)$$

Определить коэффициент теплопередачи, Вт/(м<sup>2</sup> · К),

$$k = \frac{\Phi}{A \Delta t_{CP}}, \quad (7.12)$$

где  $A$  – площадь поверхности теплообмена в аппарате (при использовании односекционного аппарата  $A = 0,09$  м<sup>2</sup>).

Определить среднеквадратичную погрешность косвенного измерения коэффициента теплопередачи

$$\frac{\Delta k}{k} = \left[ \left( \frac{\Delta m_t}{m_{t_2}} \right)^2 + 2 \left( \frac{\Delta t}{t''_2 - t'_2} \right)^2 + \left( \frac{\Delta A}{A} \right)^2 + \left( \frac{\Delta t}{\Delta t_{CP}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (7.13)$$

где  $\frac{\Delta m_t}{m_{t_2}}$  – относительная погрешность измерения расхода воды;

$\Delta t$  – абсолютная погрешность измерения температуры, °С;  $\frac{\Delta A}{A}$  –

относительная погрешность определения площади поверхности теплообмена.

При расчетах принять  $\frac{\Delta m_t}{m_{t_2}} = 0,06$  и  $\frac{\Delta A}{A} = 0,02$ , а абсолютную

погрешность измерения температуры считать равной половине цены деления шкалы термометров.

## Контрольные вопросы

1. Что называется теплообменным аппаратом?
2. Приведите классификацию теплообменных аппаратов.
3. Что такое теплопередача?
4. Запишите основные уравнения для расчета теплообменных аппаратов.
5. Что такое коэффициент теплопередачи и средний температурный напор?
6. В чем состоят преимущества и недостатки противоточной схемы присоединения аппарата по сравнению с прямоточной?
7. Как определяют момент выхода установки на стационарный тепловой режим?
8. Изобразите график изменения температур теплоносителей для противотока.
9. Изобразите график изменения температур теплоносителей для прямотока.
10. Перечислите методы интенсификации теплопередачи.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кудинов, В. А. Техническая термодинамика и теплопередача : учебник / В. А. Кудинов, Э. М. Карташов, Е. В. Стефанюк. – Москва : Юрайт, 2011. – 560 с.
2. Круглов, Г. А. Теплотехника : учебное пособие / Г. А. Круглов, Р. И. Булгакова, Е. С. Круглова. – Санкт-Петербург : Лань, 2010. – 208 с.
3. Апальков, А. Ф. Теплотехника : учебное пособие / А. Ф. Апальков. – Ростов-на-Дону : Феникс, 2008. – 188 с.
4. Теплотехника : учебник / В. Н. Луканин [и др.]. – 6-е изд., стереотип. – Москва : Высшая школа, 2008. – 672 с.
5. Амерханов, Р. А. Теплотехника : учебник / Р. А. Амерханов, Б. Х. Драганов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Энергоатомиздат, 2006. – 433 с.
6. Теплотехника : учебник / А. М. Архаров [и др.]. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. – 712 с.

Приложение 1

Термодинамические свойства воды и водяного пара в состоянии насыщения\*

$P_{\text{с}}$ , кПа	$t_{\text{с}}$ , °C	$v'$	$v''$	$h'$	$r$	$S'$ , кДж/(кг·К)
		м/кг		кДж/кг		
5	32,9	0,001	28,2	137,8	2423,4	0,476
10	45,8	0,001	14,7	191,8	2392,6	0,649
15	54,0	0,001	10,0	226,0	2372,9	0,765
20	60,9	0,001	7,65	251,5	2358,1	0,832
25	65,0	0,001	6,21	272,0	2346,1	0,893
30	69,1	0,001	5,23	289,3	2336,0	0,944
5	72,7	0,001	4,53	304,3	2327,1	0,988
40	75,9	0,001	3,99	317,7	2319,2	1,025
45	78,7	0,001	3,53	329,7	2311,9	1,060
50	81,4	0,001	3,24	340,6	2305,4	1,091
55	83,7	0,001	2,96	350,6	2299,4	1,119
60	85,9	0,001	2,73	359,9	2293,7	1,145
65	88,0	0,001	2,54	368,6	2288,4	1,169
70	89,9	0,001	2,37	376,8	2283,4	1,192
75	91,8	0,001	2,22	384,5	2278,8	1,213
80	93,5	0,001	2,09	391,7	2274,3	1,233
85	95,1	0,001	1,97	398,6	2270,0	1,252
90	96,7	0,001	1,87	405,2	2265,9	1,269
95	98,2	0,001	1,78	411,5	2262,0	1,286
100	99,6	0,001	1,69	417,5	2258,2	1,303
120	104,8	0,001	1,43	439,4	2244,4	1,361
140	109,3	0,001	1,24	458,4	2232,4	1,411
160	113,3	0,001	1,09	475,4	2221,4	1,455
180	116,9	0,001	0,98	490,7	2211,4	1,494
200	120,3	0,001	0,89	504,7	2202,2	1,540
220	123,3	0,001	0,81	517,6	2193,7	1,563

\* Принятые обозначения приведены в разделах 2 и 3.

Приложение 2

Теплофизические свойства материалов

Наименование	$t$ , °C	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\lambda$ , Вт/(м·К)	$c_p$ , кДж/(кг·К)
Асбестовые изделия	0...400	—	0,1...0,25*	0,82
Вода**	0...100	960...1 000	0,55...0,68****	4,2
Воздух**	0	1,29	0,025	1,01
Медь	0...200	9 200	395	0,38
Минераловатные изделия	0...400	50...200	0,04...0,16*	—
Пенопласты	0...150	50...150	0,03...0,07*	—
Серебро	0...200	10 500	425	0,24
Сталь: углеродистая	0...1 000	7 800	26...60****	0,46...0,7
высоколегированная	0...1 000	7 800	15...25****	0,48...0,5

\* Теплопроводность увеличивается при увеличении плотности и температуры.

\*\* Данные приведены при атмосферном давлении.

\*\*\* Теплопроводность увеличивается при увеличении температуры.

\*\*\*\* Теплопроводность снижается при увеличении температуры.

Приложение 3

Теплофизические свойства воздуха при атмосферном давлении  $B = 101$  кПа

$t$ , °C	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\alpha \cdot 10^{-6}$ , м <sup>2</sup> /с	$\lambda \cdot 10^{-2}$ , Вт/(м·К)	$\nu \cdot 10^{-6}$ , м <sup>2</sup> /с	$\beta \cdot 10^{-3}$ , 1/К	Pr
0	1,293	18,8	2,44	13,28	3,66	0,707
10	1,247	20,1	2,51	14,16	3,53	0,705
20	1,205	21,4	2,58	15,06	3,41	0,703
30	1,165	22,8	2,65	16,00	3,30	0,701
40	1,198	24,3	2,72	16,96	3,19	0,699
50	1,093	25,7	2,79	17,95	3,09	0,698
60	1,060	27,3	2,89	18,97	3,00	0,696
70	0,929	28,8	2,96	20,02	2,92	0,692
80	1,00	30,5	3,05	21,09	2,83	0,692
90	0,972	32,0	3,13	22,1	2,75	0,690
100	0,946	33,6	3,21	23,13	2,68	0,688

Приложение 4

Ориентировочные значения коэффициентов теплоотдачи

Условия конвективного теплообмена	$\alpha$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К)
Газы при естественной конвекции	6...50
Газы при вынужденной конвекции	30...300
Вода при естественной конвекции	100...1 000
Вода при вынужденной конвекции	500...10 000
Кипение воды	600...50 000
Конденсация водяного пара	4 500...140 000

Приложение 5

Ориентировочные значения коэффициентов теплопередачи

Условия конвективного теплообмена	$k$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К)
Воздух – воздух	5...25
Воздух – вода	10...50
Воздух – водяной пар	15...60
Вода – вода	150...2 000
Вода – водяной пар	1 000...3 000
Кипящая вода – водяной пар	1 000...5 000
Водяной пар – мазут	300...1 000

Учебное издание

**Коротинский** Виктор Андреевич,  
**Цубанов** Александр Григорьевич,  
**Занкевич** Владимир Александрович,  
**Синица** Светлана Ивановна

## ТЕПЛОТЕХНИКА

*Учебно-методическое пособие*

Ответственный за выпуск *В. А. Коротинский*  
Редактор *Н. А. Антипович*  
Компьютерная верстка *Н. А. Антипович*  
Дизайн обложки *Д. О. Бабаковой*

Подписано в печать 15.09.2016. Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Бумага офсетная. Ризография.  
Усл. печ. л. 5,58. Уч.-изд. л. 4,36. Тираж 70 экз. Заказ 507.

Издатель и полиграфическое исполнение:  
Учреждение образования  
«Белорусский государственный аграрный технический университет».  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий  
№ 1/359 от 09.06.2014.  
№ 2/151 от 11.06.2014.  
Пр-т Независимости, 99–2, 220023, Минск.