ПРИДНЕСТРОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМ. Т.Г. ШЕВЧЕНКО

Аграрно-технологический факультет

Кафедра эксплуатации и ремонта машинно-тракторного парка

ТЕПЛОТЕХНИКА

Лабораторный практикум

Тирасполь 2016

УДК 621.1 (076)
ББК 33р30
Т34

Составитель

Попескул А.Н., ст. преп.

Рецензенты:

Теплотехника: Лабораторный практикум / Сост. А.Н. Попескул. – Тирасполь, 2016. – 133 с.

Т34

Лабораторный практикум *составлен в соответствии с утвержденным учебным планом и программой по дисциплине «Теплотехника» к лабораторным работам для студентов 3 курса очной и заочной форм обучения направления 110800 «Агроинженерия» профилей «Технические системы в агробизнесе», «Технический сервис в АПК», «Электрооборудование и электротехнологии»*

УДК 621.1 (076)
ББК 33р30

Рекомендовано Научно-методическим советом ПГУ им. Т.Г. Шевченко
Протокол №_7_ от «_18__»__марта_____2016 г.

© ПГУ им. Т.Г. Шевченко, 2016
© А.Н. Попескул, составление, 2016

Введение

Лабораторные работы являются важным элементом подготовки студентов при изучении курса «Теплотехника». Они дают возможность закрепить теоретические знания и с помощью лабораторного оборудования на практике проверить некоторые положения теории, наглядно изучить принцип действия лабораторных установок для определения и исследования теплотехнических величин и параметров.

Выполнение лабораторных работ позволит студенту научиться самостоятельно решать задачи исследовательского характера, обрабатывать и анализировать полученные результаты опытов и делать соответствующие выводы.

В целях качественного выполнения лабораторных работ студенту необходимо уяснить теоретический материал по теме лабораторной работы, ознакомиться с описанием лабораторной установки, выяснить цель работы и ознакомиться с последовательностью ее выполнения.

При составлении отчета о проделанной лабораторной работе студенту следует кратко законспектировать важнейшие теоретические положения, зарисовать рисунки лабораторного оборудования и требуемые диаграммы. Чтобы вести протоколы испытаний необходимо начертить таблицы для записи показаний приборов и результатов расчета. Для сдачи лабораторной работы необходимо ответить устно или письменно на контрольные вопросы.

Основные правила техники безопасности

В лаборатории теплотехники используется оборудование с применением электроэнергии опасного напряжения, что может причинить серьезные травмы. Лабораторные установки должны иметь ограждающие устройства, исключающие возможность поражения электротоком. Все провода и соединения должны быть изолированы, корпуса приборов, где это необходимо, должны заземляться.

При выполнении лабораторных работ, происходит нагрев оборудования и исследуемых сред до высоких температур. Прикосновение человека к поверхности с высокой температурой может вызвать ожог. Поэтому лабораторные установки должны быть защищены специальными теплоизолирующими кожухами. Кроме того необходимо быть внимательным и не дотрагиваться до незащищенных горячих поверхностей.

Перед выполнением каждой лабораторной работы преподаватель или лаборант должны предупредить студентов о соблюдении правил техники безопасности.

Включать лабораторную установку разрешается только с разрешения преподавателя или лаборанта. Запрещается оставлять без присмотра работающие электронагревательные приборы, также использовать неисправные электронагревательные приборы. Обнаружив неисправность в электрических устройствах, находящихся под напряжением, необходимо немедленно сообщить об этом преподавателю или лаборанту. После окончания опыта или перерыва в работе установку необходимо отключать от сети.

Если человек попал под ток высокого напряжения, необходимо немедленно выключить главный рубильник и срочно вызвать скорую помощь. Если главный выключатель далеко, то постараться отодвинуть пострадавшего от источника тока при помощи деревянного предмета (предмет должен быть неэлектропроводным). До того, как это будет сделано, пострадавший может ударить током любого, кто к нему прикоснется.

Когда пострадавший будет изолирован от электрического тока, необходимо вызвать медицинскую помощь. Проверить дыхание пострадавшего и при необходимости сделать ему искусственное дыхание "рот в рот". Если у пострадавшего отсутствует сердцебиение, сделайте ему непрямой массаж сердца.

При получении ожога необходимо убрать поражающий фактор, охладить место ожога или наложить чистую влажную повязку. Далее необходимо снять все вещи с обожженного участка тела: одежду, пояс, часы, кольца и прочие вещи. Прилипшую одежду отрезать вокруг, ни в коем случае не отрывая от ожога.

Нельзя смазывать ожог маслом, кремом, мазью, белком и т.п., нельзя прокалывать пузыри, при необходимости нужно вызвать скорую помощь.

Лабораторная работа № 1

ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ВЕЩЕСТВ

1.1. Цель работы

Изучение основных методов измерений температуры веществ и ознакомление с измерительными приборами.

1.2. Задачи работы

Ознакомление с приборами, установленными в лаборатории, и с принципами их устройства; снятие показаний приборов; зарисовка принципиальных схем устройства основных приборов.

1.3. Основные понятия

Температура с точки зрения молекулярно-кинетической теории – физическая величина, характеризующая интенсивность хаотического, теплового движения всей совокупности частиц системы и пропорциональная средней кинетической энергии поступательного движения одной молекулы или атома

$$\frac{mc^2}{2} = \frac{3}{2}kT \qquad (1.1)$$

где Т – абсолютная температура, К

k – постоянная Больцмана

m – масса молекулы, кг

c^2 – средняя квадратичная скорость поступательного движения молекул

Температура, определяемая из уравнения (1.1) называется термодинамической (абсолютной). Понятие абсолютной температуры было введено У. Томсоном (Кельвином), в связи с чем шкалу абсолютной температуры называют шкалой Кельвина или термодинамической температурной шкалой. Единица абсолютной температуры — кельвин (К).

Абсолютная шкала температуры называется так, потому что мера основного состояния нижнего предела температуры — абсолютный ноль, то есть наиболее низкая возможная температура, при которой в принципе невозможно извлечь из вещества тепловую энергию.

Абсолютный ноль определён как 0 K, что равно −273,15 °C (точно).

Температуру также измеряют по шкале Цельсия, где за нуль принимают температуру таяния льда, а за 100 ^{0}C – температуру кипения воды при давлении 101325 Па. Связь между абсолютной температурой T (K) и температурой по Цельсию t (^{0}C) следующая:

$$T = t + 273{,}15 \qquad (1.2.)$$

Таким образом, температура является параметром состояния термодинамической системы. В связи с этим возникает необходимость ее измерения, что осуществляется методами и приборами, описание которых приводится далее.

1.4. Методы измерения температуры, устройство и принцип работы приборов

В качестве измерителей температуры применяются приборы, действие которых основано на использовании различных термометрических свойств жидкостей, газов и твердых тел.

1.4.1. Термометры расширения

Физическое свойство тел изменять свой объем в зависимости от температуры лежит в основе устройства термометров расширения. Термометры расширения выполняются в виде жидкостных, дилатометрических и биметаллических. Последние два типа иногда объединяют под общим названием — механические термометры.

Жидкостные термометры (рис. 1.1а). Принцип действия

жидкостных термометров основан на тепловом расширении жидкости в стекле, коэффициент термического расширения которого меньше, чем у жидкости.

Основным термометрическим веществом является ртуть. Термометры с органическими жидкостями применяются главным образом для измерения низких температур. Точность этих термометров ниже, чем ртутных, ввиду смачиваемости стекла жидкостью, и большей тепловой инерции. Достоинством ртутных термометров является большой диапазон измерений, несмачиваемость стекла ртутью, постоянство температурного коэффициента в значительной части шкалы термометра.

К недостаткам следует отнести сравнительно малый коэффициент расширения (0,0018 $\frac{\mathbf{1}}{\mathbf{°C}}$), хрупкость, невозможность дистанционной передачи показаний, значительность тепловой инерции и трудность отсчета показаний.

Таблица 1.1

Термометрические жидкости

Рабочая жидкость	Возможный предел измерения, °С	
	от	до
Ртуть	–90	+700
Толуол	–90	+100
Этиловый спирт	–100	+ 75
Петролейный эфир	–180	+ 25
Пентам	–190	+ 20

Механические термометры (рис. 1.1б). Принцип действия дилатометрических и биметаллических термометров основан на изменении линейных размеров твердых тел в зависимости от изменения их температуры.

На рис. 1.1б изображен дилатометрический термометр, который состоит из термочувствительной гильзы 1, изготовленной из металла с большим коэффициентом линейного расширения (медь, латунь, алюминий, сталь) и стержня 2,

изготовленного из материала с малым коэффициентом линейного расширения (кварц, фарфор, инвар).

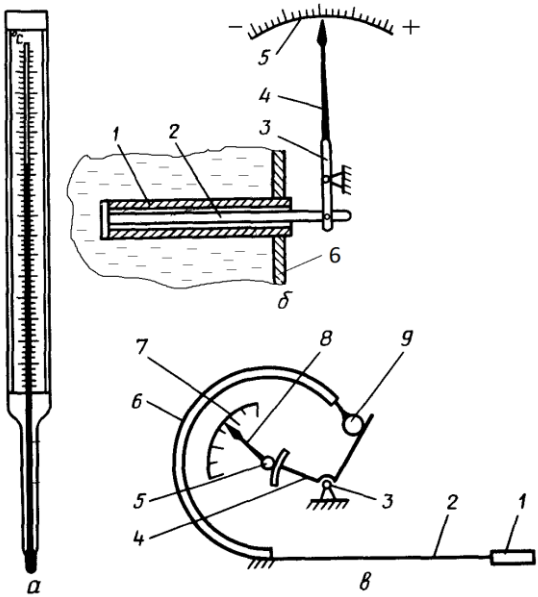

Рис.1.1. Термометры расширения:

а) жидкостные; б) дилатометрические: 1 – термочувствительный корпус, 2 – стержень, 3 – рычаг, 4 – стрелка, 5 – шкала, 6 – корпус теплового агрегата; в) манометрические: 1 – термобаллон, 2 – дистанционный капилляр, 3 – рычаг, 4 – сектор с червяком, 5 – трубка с шестерней, 6 – упругий термочувствительный элемент, 7 – шкала, 8 – стрелка, 9 – кулачок

Термочувствительная гильза 1 одним концом (справа) жестко закреплена в корпусе 6 теплового агрегата (котла, бойлера и др.) с помощью резьбового соединения. Снаружи гильзы находится среда (жидкость или газ), температуру которой необходимо контролировать. Внутри гильзы расположен металлический стержень 2, который жестко связан с другим концом гильзы (слева). Между гильзой и стержнем имеется диаметральный зазор. Когда повышается температура контролируемой среды, происходит увеличение диаметра и длины термочувствительной гильзы. Так как гильза правым концом закреплена в корпусе агрегата, то при увеличении ее длины свободный конец начинает перемещаться влево, и тянет

за собой стержень 2. В свою очередь стержень своим правым концом поворачивает рычаг 3 относительно шарнирной опоры. Верхнее плечо рычага 3 жестко связано со стрелкой 4, которая будет показывать увеличение температуры.

Манометрические термометры (рис. 1.1*в*). По принципу действия манометрические термометры разделяются на два типа:

а) газовые и жидкостные;

б) паровые.

Действие газовых и жидкостных манометрических термометров основано на изменении зависимости от температуры давления газа или жидкости, находящихся в замкнутых пространствах. Действие паровых термометров давления насыщенного пара над поверхностью жидкости.

На рис. 1.1*в* изображен манометрический термометр, который работает следующим образом. Термобаллон 1 вместе с капилляром 2 и полой трубчатой пружиной 6 образуют одну полую запаянную замкнутую систему (одну полость), внутри которой находится термометрическая жидкость или газ, которые чувствительны к температуре. Нижним концом трубчатая пружина прикреплена к корпусу. Термобаллон помещают в контролируемую среду. Когда повышается температура контролируемой среды снаружи баллона, то внутри баллона также начинает повышаться температура термометрической жидкости. Термометрическая жидкость внутри баллона начинает расширяться, но так как полая система закрытая, то внутри замкнутой полости (термобаллон-капилляр-пружина) повышается давление. В результате повышения давления внутри пружины 6 она стремится выпрямиться (развернуться), и свободный верхний конец начнет перемещаться вверх-влево. На свободном конце трубчатой пружины жестко закреплен кулачок 9, который также перемещается влево-вверх. В результате движения кулачка 9 происходит поворачивание сектора с червяком 4, который с помощью зубчатой передачи 5 будет поворачивать стрелку 8 в сторону увеличения температуры.

К достоинствам манометрических термометров относятся:

простота устройства, наглядность показаний, дистанционное измерение, взрывобезопасность.

Недостатки – небольшая точность, запаздывание показаний из-за большой тепловой инерции и невозможность ремонта на месте установки.

1.4.2. Термометры сопротивления (рис. 1.2)

Действие термометров сопротивления основано на изменении электрического сопротивления проводника при изменении температуры. Этим свойством обладают все без исключения материалы, но температурный коэффициент для каждого материала индивидуален, и, кроме того, величина коэффициента меняется с температурой.

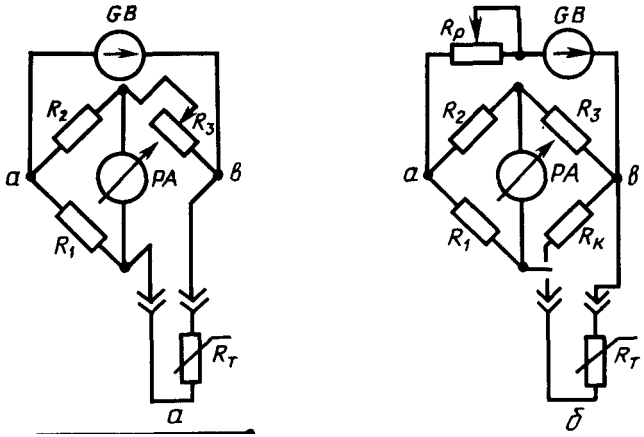

Рис. 1.2. Измерение температуры при помощи термосопротивления способом: а) уравновешенного моста; б) неуравновешенного моста

Для целей термометрии наибольшее распространение получили термометры сопротивления из платины для измерения температуры от 190 до +660ºС, меди от –55 до +220°С, никеля до 200…250°С, железа до 100…150°С, свинца для низких температур и фосфористой бронзы – для сверхнизких температур.

Термометр помещают в алюминиевую гильзу, которую в свою очередь помещают в предохранительный стальной чехол.

Измерение сопротивления у термометров этого типа производят неуравновешенными и уравновешенными мостами и логометрами, шкалы которых градуированы непосредственно в градусах.

Схема уравновешенного моста приведена на рисунке 1.2*а*. В одно из плеч моста включен термочувствительный элемент R_T. Питание от источника напряжения *GB* подключено к одной из диагоналей моста, в другую включен измерительный прибор. Если мост уравновешен, то ток в измерительной диагонали равен нулю, что достигается при соотношении сопротивлений плеч:

$$R_3 = R_T \frac{R_2}{R_1} \qquad (1.3)$$

Принцип измерения температуры состоит в том, что при изменении сопротивления R_T с помощью переменного резистора R_3 добиваются равновесия моста. Таким образом, указатель шкалы связан с подвижным контактом переменного резистора R_3, причем характер шкалы полностью соответствует температурной характеристике термочувствительного элемента. Измерительный прибор *PA* служит в качестве нуль-индикатора, а шкала переменного резистора отградуирована в ^{0}C. К преимуществам уравновешенной схемы относится независимость точности измерения от колебаний напряжения источника, что важно при использовании батарей или аккумуляторов. Недостаток схемы – необходимость ручной настройки шкалы при измерении [4].

Схема неуравновешенного моста приведена на рисунке 1.2*б*. Равновесие моста обеспечивается при настройке в одной точке температурного диапазона измерения (обычно в его начале), а при разбалансе моста определяют ток в измерительной диагонали:

$$I = \frac{U_{ab} \cdot (R_1 R_3 - R_2 R_T)}{R_2 R_3 (R_1 + R_T)} \qquad (1.4)$$

В этом случае шкала измерительного прибора *PA* отградуирована ^{0}C, но она нелинейно связана с температурной

характеристикой термочувствительного элемента, так как величина R_T входит и в числитель и в знаменатель выражения. Шкала приблизительно линейна при небольших изменениях температуры и более сжата к концу температурного диапазона. Кроме того, точность измерения существенно зависит от напряжения U_{ab}. Чтобы обеспечить его постоянство, используется переменный резистор R_P, который настраивают после переключения измерительной цепи на контрольный резистор R_K. Сопротивление R_K соответствует значению сопротивления R_T при некоторой температуре, которая на шкале отмечена красным. При переключении на сопротивление R_K указатель PA должен устанавливаться на этой метке. Таким образом, при использовании уравновешенной схемы измерения необходимо обеспечить стабильность напряжения моста.

1.4.3. Термоэлектрические термометры (рис. 1.3)

Термоэлектрический преобразователь (термопара) работает на основании возникновения термо-эдс E в цепи, состоящей из двух разнородных проводников, при наличии разности температур T и T_0 соединений их концов:

$$E(T,T_0) = f(T) - f(T_0) \qquad (1.5)$$

Обычно одно из соединений термопары (холодный спай) находится в среде с постоянной температурой T_0, а другое (горячий спай) – в исследуемой среде с температурой T. Зависимость $f(T)$ близка к линейной и определяется материалами проводников термоэлектрической цепи.

В качестве термоэлектрических материалов применяют чистые металлы: платину, железо, медь, а также специальные сплавы, название и состав которых приведены в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Термоэлектрические материалы

Наименование сплава	Состав	
Алюмель	95% Ni	+ 5% Al, Si, Mg
Константан	60% Cu	+40 % Ni
Копель	56% Cu	+44'% Ni
Платинородий	90% Pt	+ 10% Rh
Хромель	90% Ni	+ 10% Cr

Наибольшее распространение получили термопары, характеристика которых приведена в приложении 1.

Промышленные термопары, изготовленные из толстой проволоки (диаметром 3…5 мм), невозможно протянуть до термостата. Поэтому от конца термоэлектродов, заканчивающихся в клеммной головке термопары, проводку осуществляют так называемыми компенсационными проводами, являющимися по существу гибким продолжением термопары. Компенсационные провода чаще всего изготовляют из тех же термоэлектродных материалов, из которых изготовлена монтируемая термопара; для платинородий-платиновой термопары компенсационные провода подобраны из таких металлов, которые в паре с платиной и платинородием не образуют термоэлектродвижущей силы.

Применением компенсационных проводов достигается отнесение холодных концов термопары, которыми являются в таком случае концы компенсационных проводов, в такое место, где они могут быть легко термостатированы.

Предохранительные чехлы промышленных термопар в зависимости от свойств среды, в которой производится измерение температуры, изготавливают из материалов, чаще всего сталей, способных противостоять механическим и коррозионным воздействиям.

Термо-эдс измеряют с помощью милливольтметров и потенциометров.

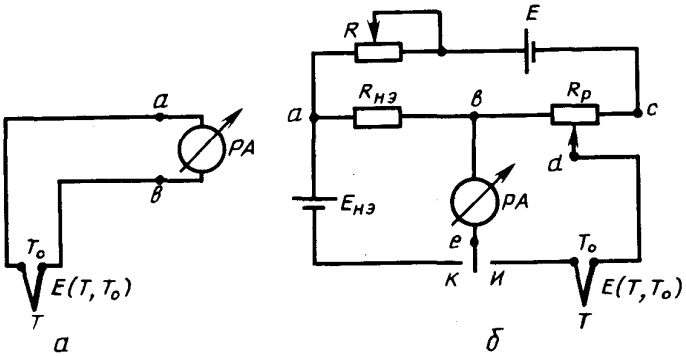

Рис. 1.3. Измерение термо-ЭДС при помощи термопар:
а) микровольтметром; б) потенциометром

На рис. 1.3*а* показан способ измерения термо-эдс с помощью вольтметра. Напряжение на выводах милливольтметра РА связано с термо-эдс соотношением:

$$U_{ab} = \frac{E(T, T_0)}{1 + \frac{R_Ц}{R_{ВН}}} \qquad (1.6)$$

где $R_{ВН}$ – внутреннее сопротивление вольтметра кОм;

$R_Ц$ – сопротивление измерительной цепи, в которое входит сопротивление термопары, соединительных проводов, контактов и т. д., Ом.

На рис. 1.3б показан способ измерения термо-эдс с помощью потенциометра. В этом случае используют метод уравновешивания термо-эдс известным напряжением $Н_{НЭ}$.

Вначале обеспечивается постоянство тока в цепи потенциометра R_P. Для этого переключатель ставят в положение *К* и с помощью переменного резистора *R* добиваются нулевого значения на шкале измерительного прибора *РА,* что соответствует току $I=E_{НЭ}/R_{НЭ}$ в ветви *ас.* Затем переключатель переводят в положение *И* и добиваются нуля в цепи *РА* с помощью потенциометра R_p, что соответствует равенству разности потенциалов между точками *b* и *d*, т. е.:

$$E(T,T_0) = I \cdot R_{bd} = E_{НЭ} \cdot R_{bd}/R_{НЭ} \qquad (1.7)$$

Так как $E_{НЭ}$ и $R_{НЭ}$ – величины постоянные, то измерение сводится к определению сопротивления R_{bd}, а подвижный контакт потенциометра R_P непосредственно связан со шкалой температуры.

При измерении температуры с помощью термопар не требуются дополнительные источники питания. К недостаткам этих приборов относятся низкая температурная чувствительность и необходимость учитывать температуру холодных спаев.

1.4.4. Пирометры излучения

Измерение температуры тел, накаленных выше 800 °С, производится определением величины излучения, испускаемого этими телами.

Величина излучения отличается от величины излучения абсолютно черного тела. Это отличие характеризуется коэффициентом или степенью черноты, представляющим собой отношение количества лучистой энергии к энергии, испускаемой абсолютно черным телом при равенстве температур. Лучеиспускание абсолютно черного тела является наибольшим и потому коэффициент черноты всегда меньше единицы.

Возможность определения температуры реальных тел, имеющих различную степень черноты, одним и тем же прибором, достигается градуировкой приборов по температуре абсолютно черного тела.

Такой способ градуировки приводит к получению заниженных результатов. Правильная температура определяется введением поправок на степень черноты тела.

1.5. Проведение работы

В ходе работы студенты знакомятся под руководством преподавателя с назначением и устройством измерительных

приборов, принципами их действия, снимают показания приборов, установленных в лаборатории. По указанию преподавателя студенты осуществляют измерение температуры в контрольных точках (например температуру воздуха внутри и снаружи помещения, температуру подогретой воды в колбе, температуру поверхности радиатора отопления в зимний период).

1.6. Оформление отчета

Отчет по работе должен включать перечень и краткое описание основных способов измерения давления, скорости и расхода жидкостей и газов, схемы устройства основных приборов, запись выполненных измерений. Выполненные измерения температуры сводятся в табл. 1.3.

Таблица 1.3

Протокол измерений температуры

Прибор для измерения температуры	Показания прибора в контрольной точке, ^{0}C			
	1	2	3	4

1.7. Контрольные вопросы

1. Дать определение температуры, для чего нужно ее измерять.
2. Перечислить термометрические жидкости, применяемые в жидкостных термометрах расширения.
3. На каком принципе работают дилатометрические термометры?
4. Какой эффект применяется в работе термопар?

Лабораторная работа № 2

ИЗМЕРЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ И РАСХОДА ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ

2.1. Цель работы

Изучение основных методов измерений давления и расхода жидкостей и газов и ознакомление с измерительными приборами.

2.2. Задачи работы

Ознакомление с приборами, установленными в лаборатории, и с принципами их устройства; снятие показаний приборов; зарисовка схем измерений и принципиальных схем устройства основных приборов.

2.3. Основные сведения, устройство и принцип работы приборов

В качестве рабочего тела в тепловых машинах и аппаратах применяются различные жидкости и газы. Для оценки состояния термодинамической системы необходимо измерять такие параметры, как давление и расход рабочего тела. Для этого применяются различные манометры, вакуумметры и расходомеры.

2.3.1. Приборы для измерения давления

Приборы для измерения давления по принципу действия делят на 4 основные группы: жидкостные, измеряющие давление высотой уравновешивающего столба жидкости; пружинные, где давление оценивают по деформации различного рода упругих элементов; грузо-поршневые, в которых измеряемое давление уравновешивается давлением, создаваемым массой грузов и поршня; электрические, работа

которых основана на зависимости электрических параметров преобразователя от измеряемого давления.

Жидкостные манометры (рис. 2.1) используются для измерения небольших значений избыточных давлений, вакуума или разности давлений. Эти приборы просты по устройству, однако дают точные показания. Они бывают двух видов: U-образные и чашечные (рис 2.1)

Рабочей жидкостью в манометрах может быть дистиллированная вода, ртуть, этиловый спирт, толуол и др.

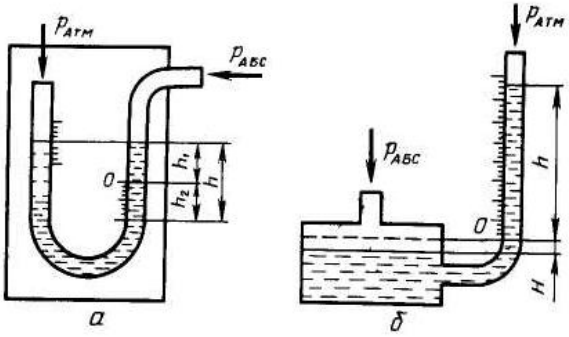

Рис. 2.1. Жидкостные манометры:
а) U-образный двухтрубный; б) чашечный однотрубный

В U-образном манометре избыточное давление или разрежение (Па) уравновешивается столбом жидкости h (м) и определяется по формуле:

$$P = h \cdot (\rho - \cdot \rho_{CP}) \qquad (2.1)$$

Где ρ – плотность рабочей жидкости, кг/м^3;

ρ_{CP} – плотность среды над рабочей жидкостью, кг/м^3;

g – ускорение свободного падения, м/с^2.

Величину отсчитывают по двум уровням по обе стороны от нулевого деления шкалы.

В чашечном манометре давление измеряется положением уровня жидкости в одной узкой трубке, а изменением высоты жидкости в широком сосуде обычно пренебрегают, но если

отношение сечений измерительной трубки и сосуда $f/F>0,01$, то формула приобретает вид:

$$P = h \cdot \rho \cdot g(1+f/F) \qquad (2.2)$$

Пружинные манометры (рис. 2.2). В пружинных приборах чувствительными элементами могут быть: трубчатые одно- или многовитковые пружины, мембраны, мембранные коробки и сильфоны.

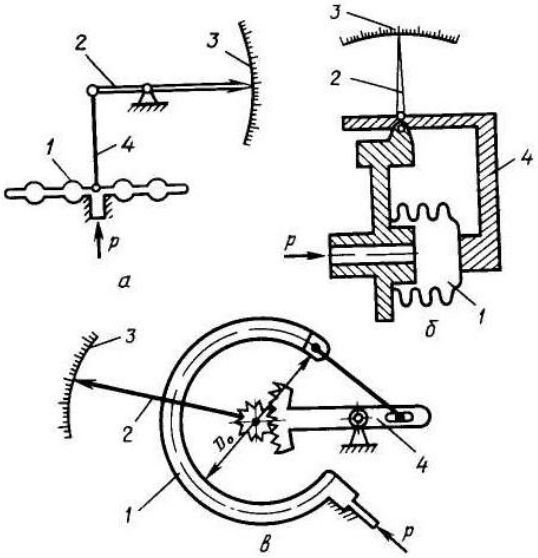

Рис. 2.2. Деформационные манометры:
а) пружинный; б) сильфонный; в) трубчато-пружинный;
1 – измерительный элемент, 2 – указатель, 3 – шкала, 4 – рычаг

Аналогичны по устройству трубчатые вакуумметры и мановакуумметры.

2.3.2. Приборы для измерения расхода веществ

Очень удобен для непосредственного измерения расхода газов или прозрачных жидкостей ротаметр (рис. 2.3), являющийся расходомером обтекания. Перепад давления в нем

сохраняется постоянным, а проходное сечение ротора (подвижного сопротивления), витающего в потоке измеряемой среды, изменяется прямо пропорционально расходу. В зависимости от скорости потока ротор устанавливается на определенной высоте в стеклянной конической (расширяющейся кверху) трубке ротаметра, показывая значение расхода на протарированной шкале. На цилиндрическом пояске ротора сделаны косые прорези для того, чтобы он, вращаясь под действием потока, центрировался в трубке прибора.

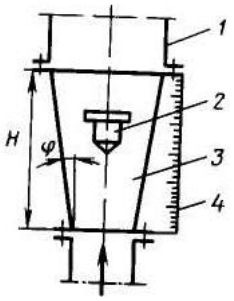

Рис. 2.3. Ротаметр: 1 – трубопровод, 2 – поплавок, 3 – корпус, 4 – шкала

Стеклянным ротаметром можно пользоваться в установках, имеющих вертикальные участки трубопроводов, если давление измеряемой среды не превышает 0,6 МПа, а температура не более 50°С. Изготавливаются и металлические ротаметры, более сложные по устройству. Показания ротора в них передаются на расстояние посредством электрической или пневматической системы передачи.

Расход жидкостей измеряют также при помощи скоростных счетчиков-расходомеров (рис 2.4а). Вращение крыльчатки или винтовой вертушки в них через редукторный механизм передается на счетчик прибора, показывающим расход жидкости (обычно в $м^3$/ч).

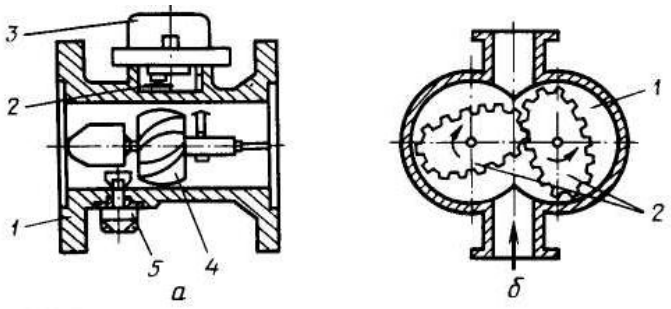

Рис. 2.4. Тахометрические расходомеры:
а) турбинный: 1 – корпус, 2 – передаточный счетный механизм, 3 – тахогенератор, 4 – турбина, 5 – устройство для регулирования точности; б) камерный с овальными шестернями: 1 – камера, 2 – шестерни

Крыльчатые расходомеры применяют для измерения малых расходов жидкостей (до 9,5 $м^3$/ч.).

Объемные счетчики (рис 2.4б) показывают суммарный расход вещества за данное время. Жидкость или газ приводит в движение поршень или овальные шестерни (у счетчиков жидкости), или роторы (у счетчиков газа), которые кинематически связаны с суммирующим счетным механизмом прибора.

Широко применяют в лабораторной практике и в производственных условиях измерения расхода жидкости с помощью мерных баков, оборудованных указательными стрелками и шкалами, градуированными в единицах массы или объема, а также различные весовые расходомеры. По разности показаний в начале и конце периода измерения определяют расход вещества.

2.4. Проведение работы

В ходе работы студенты знакомятся под руководством преподавателя с назначением и устройством измерительных приборов, принципами их действия, снимают показания приборов, установленных в лаборатории.

2.5. Оформление отчета

Отчет по работе должен включать цель работы, задачи работы, перечень и краткое описание основных способов

измерения давления и расхода жидкостей и газов, схемы устройства основных приборов, запись выполненных измерений. Измеряемые величины сводятся в таблицу 2.1.

Таблица 2.1

Измеренные величины

Измерительный прибор	Единица измерения	Показания прибора

2.6. Контрольные вопросы

1. Дать определение давления газа. Какие виды давления бывают?
2. Используя схему рассказать принцип действия жидкостного манометра.
3. Что такое ротаметр, каков принцип его работы, в каких случаях он применяется?
4. Привести примеры пружинных манометров.

Лабораторная работа №3

ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОВ ИДЕАЛЬНЫХ ГАЗОВ

3.1. Цель работы

Получить понятие об идеальных и реальных газах, какими термодинамическими параметрами описывают их состояние, и какие законы при этом используют.

3.2. Задачи работы

Используя уравнение состояния научиться определять основные теплотехнические параметры идеальных газов при различных термодинамических условиях. Проверить закон Клапейрона.

3.3. Теоретические положения

Рабочим телом называют вспомогательное вещество, используемое для работы той или иной тепловой машины (теплового двигателя, холодильной установки, теплового насоса).

В подавляющем большинстве случаев рабочее тело является газообразным веществом.

Рабочие газообразные тела обычно делят на *идеальные* и *реальные* газы. Под идеальным газом понимают воображаемый газ, в котором отсутствуют силы межмолекулярного взаимодействия, а сами молекулы имеют пренебрежимо малый объем. Реальный газ состоит из молекул, объемом которых пренебречь нельзя и между молекулами существуют силы взаимодействия. Одно и то же рабочее тело относят к идеальному газу или реальному в зависимости от термодинамического состояния, в котором оно находится.

Термодинамическое состояние газообразного вещества характеризуется тремя основными параметрами: *абсолютное давление, удельный объем* и *температура.*

Для измерения давления используют *барометры*, *манометры* и *вакуумметры* различных типов. С помощью барометров измеряют атмосферное давление. Манометры используют для измерения разности давлений в резервуаре (установке) и атмосферным в том случае, если это давление больше атмосферного. В противном случае используются вакуумметры.

Абсолютное давление подсчитывают по формулам:

$$P_{АБС} = P_{МАН} + P_{БАР} \quad (3.1)$$

$$P_{АБС} = P_{БАР} – P_{ВАК} - \quad (3.2)$$

где $P_{АБС}$, $P_{МАН}$, $P_{БАР}$, $P_{ВАК}$ – соответственно, абсолютное, манометрическое, барометрическое давление и давление вакуумметра.

Для измерения давления пользуются различными единицами измерения. Соотношения между этими единицами следующие:

1 Па = 1 Н/м^2

1 атм. = 10^5 Па = 760 мм рт. ст.,

1 мм рт. ст. = 13,5951 мм вод. ст.

Удельный объем вещества представляет собой объем, занимаемый единицей массы этого вещества:

$$v = \frac{V}{m} \quad (3.3)$$

где V – действительный объем тела, м^3;

M – масса тела, кг.

При измерении температуры пользуются термометрами различных типов и двумя основными температурными шкалами: шкалой Цельсия и абсолютной (шкалой Кельвина).

Связь между *абсолютной* температурой и температурой *по шкале Цельсия* выражается формулой:

$$T = t + 273 \quad (3.4)$$

где T – абсолютная температура, К;

t – температура по шкале Цельсия, °С.

Для сравнения различных газов между собой по объему их приводят к гак называемым *нормальным физическим условиям*

(НФУ), характеризующимся давлением $P_Н$ = 760 мм рт. ст. (0,1013 МПа) и температурой $t_Н$ = 0 °С (273 К).

Основные параметры газа связаны между собой функциональной зависимостью, называемой *уравнением состояния*:

$$f(p, v, T) = 0 \qquad (3.5)$$

Наиболее простым уравнением состояния является *уравнение Клапейрона-Менделеева* для идеального газа:

$$p \cdot V = M \cdot R_Г \cdot T \qquad (3.6)$$

где р – абсолютное давление газа, Па;

V – действительный объем газа, $м^3$;

М – масса газа, кг;

$R_Г$ – индивидуальная газовая постоянная, Дж/(кг·К) (см. приложение 2);

Т – абсолютная температура, К.

Для 1 кг газа уравнение (3.6) имеет вид:

$$p \cdot v = R_Г \cdot T \qquad (3.7)$$

где v – удельный объем, $м^3$/кг.

Газовая постоянная $R_Г$ представляет собой физическую постоянную, которая для каждого газа принимает вполне определенное значение, зависящее от природы газа и не зависящее от его состояния.

Уравнение (3.7) можно записать для 1 кмоль газа, умножая обе части уравнения на молекулярную массу μ:

$$p \cdot v \cdot \mu = \mu_Г \cdot R_Г \cdot T \text{ или } \quad p \cdot V_\mu = \mu \cdot R_Г \cdot T \qquad (3.8)$$

где $\mu_Г$ – молекулярная масса газа, кг/кмоль (см. приложение 2);

V_μ – объем одного кмоль вещества, $м^3$/кмоль;

$\mu \cdot R_Г = R_\mu$ – универсальная газовая постоянная, Дж/(кмоль·К).

Универсальная газовая постоянная R_μ не зависит от состояния газа и одинакова для всех идеальных газов. Значение R_μ можно определить из уравнения (1.8), записывая его для НФУ, при которых V_μ любого идеального газа равен 22,4 м^3/кмоль (следствие из закона Авогадро): R_μ = 8314 Дж/(кмоль·К).

Зная универсальную газовую постоянную R_μ, можно подсчитать индивидуальную газовую постоянную $R_Г$, которую иногда, в отличие от универсальной, называют характеристической:

$$R_Г = \frac{8314}{\mu_Г}, \text{ Дж/(кг·К)} \qquad (3.9)$$

Закон Клапейрона (объединенный газовый закон).

Если изменяются параметры p, V и T, а число молекул N газа остается неизменным, то состояние идеального газа описывается уравнением Клапейрона:

$$\frac{p \cdot V}{T} = const \quad \text{при} \quad N = \text{const} \qquad (3.10)$$

3.4. Описание экспериментальной установки и подготовка к работе

Колбу *3* с термометром *4* помещают в химический стакан *5*, установленный на электроплитке *6*, и закрепляют с помощью регулировочного винта *1* лапки штатива *2* (для устойчивого положения, когда колба будет находиться в воде).

Для равномерного нагревания воздуха воду в стакан наливают так, чтобы колба почти полностью находилась в воде. В открытой колбе, т.е. когда зажим *7* открыт, уровень воды в обоих коленах манометра *8* должен совпадать с нулем миллиметровой шкалы *9*. Кроме того, шкалу манометра можно перемещать, ослабив регулировочные винты *10*, на несколько миллиметров вверх или вниз для более точного совмещения нуля шкалы с первоначальным уровнем воды.

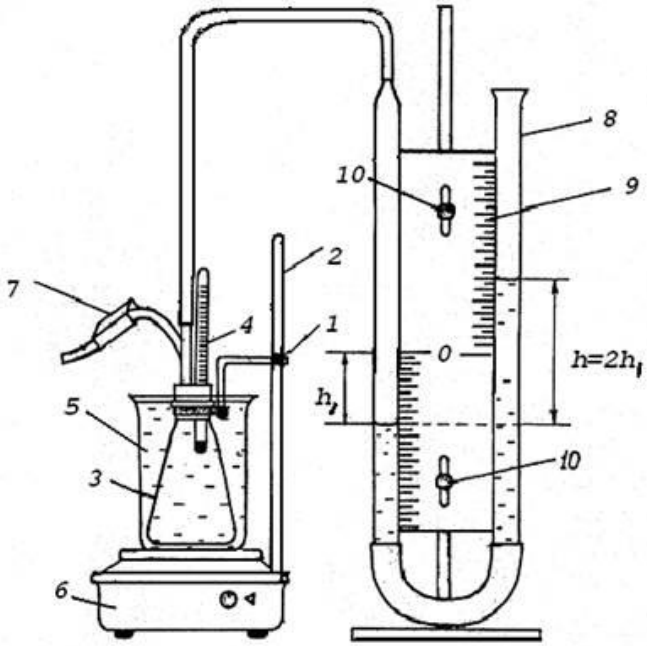

Рис. 3.1. Схема лабораторной установки

3.5. Порядок выполнения работы и обработка результатов измерений

1) Ослабить зажим *7* и проверить, совпадает ли уровень воды в коленах манометра с нулем шкалы.

2) Записать в таблицу 3.1 начальные значения параметров состояния воздуха в колбе: T_0 и p_0, которые определяют с помощью термометра и барометра. Объем колбы V_0 и площадь S внутреннего сечения трубок манометра необходимо выяснить у преподавателя, ведущего занятия, или лаборанта. Давление p_0, измеренное с помощью барометра в миллиметрах ртутного столба переводят в паскали (1 мм рт.ст. = 133 Па).

Таблица 3.1

Начальные параметры воздуха

t_0	T_0	p_0	p_0	V_0	$\frac{p_0 \cdot V_0}{T_0}$
°С	К	мм рт.ст.	Па	$м^3$	Дж/К

3) Перекрыть с помощью зажима *7* доступ воздуха в колбу и включить электрический нагреватель *6*.

4) Для проверки уравнения Клапейрона воздух в закрытой колбе *3* (рис. 3.1) нагревают с помощью электроплитки *6* до температуры 40 ÷ 50 °С, регистрируя изменение высоты столба воды в коленах водяного манометра *8* через каждые 4 ÷ 6 °С. В зависимости от числа опытов, уравнение (3.10) примет вид:

$$\frac{p_0 \cdot V_0}{T_0} = \frac{p_1 \cdot V_1}{T_1} = \frac{p_2 \cdot V_2}{T_2} = ... = \frac{p_n \cdot V_n}{T_n} const \quad (3.11)$$

где p_0 и V_0 – первоначальные давление и объем воздуха в колбе при комнатной температуре T_0.

Нагревание воздуха в закрытой колбе до температуры T_1 сопровождается ростом давления, которое определяют по формуле:

$$p_1 = p_0 + \rho \cdot g \cdot h \quad (3.12)$$

где ρ – плотность воды ($\rho = 1000$ кг/$м^3$),

h – разность уровней воды в коленах манометра.

Для удобства измерения h начало миллиметровой шкалы совмещают с первоначальным уровнем воды в коленах манометра. Тогда $h = 2h_1$ и формула (3.12) примет вид:

$$p_1 = p_0 + 2\ \rho \cdot g \cdot h_1 \quad (3.13)$$

Объем воздуха при температуре T_1 также увеличивается, вытесняя столб жидкости в манометре на величину h_1:

$$V_1 = V_0 + S \cdot h_1 \quad (3.14)$$

где S – площадь внутреннего сечения стеклянных трубок манометра.

4) Фиксируют по шкале манометра значения h_1, h_2, h_3, …, h_n соответствующие температурам T_1, T_2, T_3, …, T_n. Данные измерений заносят в таблицу 3.2.

Таблица 3.2

Результаты измерений

№ опыта	t	T	h	p	V	$\frac{p_i \cdot V_i}{T_i}$
	°C	K	м	Па	$м^3$	Дж/К
1						
2						
…						

Внимание! По окончании измерений немедленно ослабить зажим 7 и выключить электроплитку.

5) Используя формулы (3.13) и (3.14), находят давления и объемы, а затем определяют значения соотношений по формулам 3.11 которые согласно закону Клапейрона, должны быть равны друг другу.

Результаты вычислений заносят в таблицу 3.2.

3.6. Оформление отчета

Отчет по работе должен включать цель работы, задачи работы, схему и описание лабораторной установки, таблицы измерений и результатов вычислений.

3.7. Контрольные вопросы

1) Чем отличаются идеальные и реальные газы?

2) Какими основными параметрами описывают состояния реальных и идеальных газов?

3) Какие составляющие входят в уравнение Клапейрона-Менделеева?

4) Как и при каких условиях определяют значение универсальной газовой постоянной?

5) По какой формуле можно определить индивидуальную газовую постоянную?

Лабораторная работа № 4

ИЗУЧЕНИЕ СПОСОБОВ ЗАДАНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ

4.1. Цель работы

Получить понятие о том, что собой представляет газовая смесь, что такое парциальное давление газов и чему равно общее давление газовой смеси, какими способами ее можно задавать.

4.2. Задачи работы

Научиться определять параметры газовой смеси, производить пересчет из одного способа задания газовой смеси в другой.

4.3. Теоретические положения

Под газовой смесью понимается смесь газов, не вступающих между собой в химические реакции. Составляющие смесь отдельные газы называются *компонентами.* Каждый компонент смеси распространяется по всему объему смеси.

Давление, которое имел бы каждый компонент, входящий в состав смеси, если бы он находился один в том же объеме и при той же температуре, что и смесь, называется *парциальным давлением компонента* (от латинского pars - часть).

По закону *Дальтона* давление смеси равно сумме парциальных давлений ее компонентов, т.е.:

$$P_{CM} = P_1 + P_2 + ... + P_n = \sum_1^n P_i \text{ , Па} \qquad (4.1)$$

$P_{1,2,...,n}$ – парциальные давления газов, составляющих данную смесь, Па;

Итак, каждый компонент смеси, занимая весь объем смеси, находится под своим парциальным давлением. Но если этот компонент поместить под давлением P_{CM} при той же температуре смеси T_{CM}, то он займет объем Vi меньший, чем объем V_{CM}. Этот объем V_i называют *приведенным* или *парциальным.*

Объем смеси равен сумме парциальных объемов ее компонентов:

$$V_{CM} = V_1 + V_2 + ... + V_n = \sum_1^n V_i \qquad (4.2)$$

где V_{CM} – полный объем смеси газов, м^3;

V_1, V_2,...,V_n – объемы компонентов смеси при P_{CM} и T_{CM}.

Состав газовой смеси чаще всего задается массовым или объемным способом.

Массовой долей каждого компонента называется отношение массы данного компонента к массе всей смеси:

$$g_i = \frac{m_i}{m_{CM}} \qquad (4.3)$$

где m_i – масса данного компонента, кг;

m_{CM} – масса всей смеси, содержащая «n» компонентов, кг.

Очевидно, что сумма массовых долей компонентов входящих в смесь, всегда равна единице:

$$g_1 + g_2 + ... + g_n = 1 \qquad (4.4)$$

Объемной долей компонента называется отношение парциального объема данного компонента V_i к объему всей смеси V_{CM}:

$$r_i = \frac{V_i}{V_{CM}} \tag{4.5}$$

Очевидно, что сумма объемных долей компонентов, входящих в смесь, всегда равна единице:

$$r_1 + r_2 + \ldots + r_n = 1 \tag{4.6}$$

Для упрощения расчетов газовую смесь условно заменяют газом, состоящим из однородных одинаковых по массе молекул, который по числу молекул и массе эквивалентен газовой смеси. Для решения практических задач по газовым смесям введено понятие о кажущейся или средней молекулярной массе газовой смеси:

$$\mu_{CM} = \sum_1^n (r_i \cdot \mu_i) = \frac{1}{\sum \frac{g_i}{\mu_i}} \tag{4.7}$$

где μ_i – молекулярная масса отдельного газа в смеси, кг/кмоль (см. приложение 2).

Для пересчета из одного состава в другой используют следующие формулы:

$$r_i = \frac{g_i \cdot \mu_{CM}}{\mu_i} \tag{4.8}$$

$$g_i = \frac{r_i \cdot \mu_i}{\mu_{CM}} \tag{4.9}$$

Для определения газовой постоянной смеси используют следующую формулу:

$$R_{CM} = \frac{8314}{\mu_{CM}} = \sum (g_i \cdot R_i) = \frac{1}{\sum \frac{r_i}{R_i}}, \text{ кДж/(кг·К)} \tag{4.10}$$

где R_i – индивидуальная газовая постоянная отдельного компонента в смеси, кДж/кг·К (см. табл. 3.1, стр. 27)

Парциальное давление отдельного компонента определяют по формуле:

$$P_i = g_i \frac{R_i}{R_{CM}} P_{CM} = r_i \cdot P_{CM}\text{, Па} \qquad (4.11)$$

Плотность газовой смеси определяют:

$$\rho_{CM} = \frac{1}{\sum \frac{g_i}{\rho_i}} = \sum (r_i \cdot \rho_i)\text{, кг/м}^3 \qquad (4.12)$$

где ρ_i – плотность отдельного газа, входящего в смесь, кг/м^3 (см. табл. 3.1, стр. 27).

Для расчета параметров состояния газовой смеси, состоящей из идеальных компонентов, можно использовать уравнение Клапейрона-Менделеева:

$$P_{CM} \cdot V_{CM} = m_{см} \cdot R_{CM} \cdot T_{CM} \qquad (4.13)$$

4.4. Порядок выполнения работы

1) Получить у преподавателя исходные данные: состав газовой смеси, значение давления газовой смеси.

2) По формуле 4.1 определить давление газовой смеси.

3) Используя формулы (4.8) или (4.9) сделать пересчет из одного способа задания состава в другой. Выполнить проверку по формулам (4.4) или (4.6)

4) Определить молекулярную массу газовой смеси, используя формулу (4.7).

5) Определить парциальные давления газов, входящих в смесь по формуле (4.11)

6) Определить плотность газовой смеси по формуле (4.12).

4.5. Оформление отчета

Отчет по работе должен включать цель работы, задачи работы, результаты вычислений.

4.6. Контрольные вопросы

1) Что называют газовой смесью?

2) Что такое парциальное давление газа, входящего в смесь?

3) Что гласит закон Дальтона?

4) Какими способами можно задавать газовую смесь?

5) Что такое кажущаяся молекулярная масса газовой смеси?

Лабораторная работа №5

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОЕМКОСТИ ГАЗОВ

5.1. Цель работы

Получить понятие об удельной теплоемкости вещества или газа, какие виды теплоемкости бывают, от чего они зависят. Изучить экспериментальную методику определения теплоемкости воздуха.

5.2. Задачи работы

Методом простого калориметра определить среднюю теплоемкость воздуха для интервала температур.

5.3. Теоретические положения

Удельной теплоемкостью вещества называют количество теплоты, которое необходимо сообщить телу (газу), чтобы повысить температуру какой-либо количественной единицы на 1 °С или 1 К.

Количество вещества может быть задано массой (кг), объемом ($м^3$), молярной массой (кмоль), поэтому различают три вида теплоемкости:

1) Массовая C, Дж/(кг·К)
2) Объемная C', Дж/($м^3$·К)
3) Мольная C_μ, Дж/(кмоль·К)

Связь между массовой, объемной и мольной теплоемкостями представлена следующими формулами:

$$C = \frac{C_\mu}{\mu} \qquad C = C' \cdot v \qquad C' = \frac{C_\mu}{22{,}4} \qquad (5.1)$$

Теплоемкость идеальных газов зависит от атомности, характера процесса и температуры.

Теплоемкость реальных газов, кроме перечисленных выше факторов, зависит еще и от давления.

Для практических расчетов зависимость теплоемкости от температуры достаточно точно будет определяться уравнением второй степени:

$$C = a + b \cdot t + e \cdot t^2. \qquad (5.2)$$

Значения a, b и e (табличные данные) будут различны для разных видов теплоемкостей.

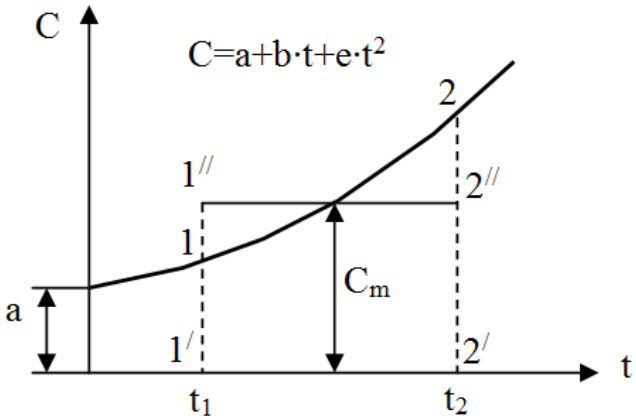

Рис. 5.1. Зависимость теплоемкости от температуры

График зависимости теплоемкости от температуры, определяемый уравнением второй степени представлен на рис. 5.1.

Различают также среднюю теплоемкость, которая в интервале температур от t_1 до t_2 равна:

$$C_m = \frac{q_{1-2}}{t_2 - t_1} \qquad (5.3)$$

где q_{1-2} – количество теплоты, подведенное в процессе 1-2, кДж/кг;

t_1 и t_2 – температура в начале и в конце процесса 1-2 подвода теплоты, °С.

Если выражение (5.3) записать для бесконечно малого количества теплоты *dq* и интервала температур *dt*, то получим формулу так называемой *истинной* теплоемкости С при данной температуре t:

$$C = \frac{dq}{dt} \qquad (5.4)$$

Подведенное количество теплоты для уравнения второй степени определяется по формуле:

$$q_{1-2} = \int_{t_1}^{t_2} (a + bt + et^2)dt \text{, Дж/кг} \qquad (5.5)$$

На рис. 5.1 количество теплоты q_{1-2} изображается площадью $1'$-1-2-$2'$-$1'$.

Это же количество теплоты можно выразить через среднюю теплоемкость:

$$q_{1-2} = C_m \cdot (t_2 - t_1) \text{, Дж/кг} \qquad (5.6)$$

В данном случае на рис. 5.1 количество теплоты q_{1-2} изображается площадью $1'$-$1''$-$2''$-$2'$-$1'$

Применение выражения (5.6) удобно при наличии таблиц средних теплоемкостей ${}_0^t C_m$ в интервале температур от 0 до t.

В некоторых случаях требуется, пользуясь таблицами средних теплоемкостей ${}^{t}_{0}C_{m}$ определить среднюю табличную теплоемкость ${}^{t_2}_{t_1}C_{m}$ для интервала температур ($t_2 - t_1$). Для этого можно использовать формулу:

$$ {}^{t_2}_{t_1}C_{m} = \frac{{}^{t_2}_{0}C_{m} \cdot t_2 - {}^{t_1}_{0}C_{m} \cdot t_1}{t_2 - t_1} \qquad (5.7) $$

В теплотехнике особое значение имеют два случая нагревания (охлаждения): при постоянном давлении (изобарный процесс) и при постоянном объеме (изохорный процесс). Обоим этим случаям соответствуют *изобарные* и *изохорные* теплоемкости, имеющие в обозначениях индексы «р» и «V».

При p = const: изобарная массовая (C_P), изобарная объемная (C_P') и изобарная мольная ($C_{P\mu}$) теплоемкости.

При v = const: изохорная массовая (C_V), изохорная объемная (C_V') и изохорная мольная ($C_{V\mu}$) теплоемкости.

Изобарная теплоемкость всегда больше изохорной :

$$ C_P > C_V \qquad C_P' > C_V' \qquad C_{P\mu} > C_{V\mu} $$

Для идеальных газов связь между изобарной и изохорной теплоемкостями устанавливается уравнениями Майера:

$$ C_P - C_V = R, \text{ кДж/(кг·К)} \qquad (5.8) $$

$$ C_{P\mu} - C_{V\mu} = R_\mu = 8314 \text{ кДж/(кг·К)} \qquad (5.9) $$

В технической термодинамике большое значение имеет отношение теплоемкостей при постоянном давлении и постоянном объеме, называемое *показателем адиабаты k:*

$$k = \frac{C_P}{C_V} \tag{5.10}$$

Теплоемкости газовых смесей определяют по формулам:

$$C_{CM} = \Sigma(C_i \cdot g_i) \tag{5.11}$$

$$C'_{CM} = \Sigma(C'_i \cdot r_i) \tag{5.12}$$

$$C_{\mu\, CM} = \Sigma(C_{\mu i} \cdot r_i) \tag{5.13}$$

где g_i и r_i – соответственно массовая и объемная доля i-го компонента газовой смеси;

C_i, C'_i, $C_{\mu i}$ – соответственно массовая, объемная и киломольная теплоемкость i-го компонента;

$C_{см}$, $C'_{см}$, $C_{\mu CM}$ – соответственно массовая, объемная и киломольная теплоемкость газовой смеси;

5.4. Описание лабораторной установки

Принципиальная схема электрокалориметра приведена на рис. 5.1. Установка состоит из простого калориметра 2, внутри которого помещена нихромовая спираль 3, служащая для подогрева проходящего воздуха. Для снижения тепловых потерь в охлаждающую среду калориметр окружен оболочкой 5.

На оси калориметра укреплена дифференциальная хромель-алюмелевая термопара 1, с помощью которой производится замер разности температур воздуха Δt_B на входе и выходе калориметра (холодные спаи расположены на входе, горячие на выходе). Вакуумный насос 12 создает разрежение, под действием которого атмосферный воздух проходит через калориметр. Количество проходящего воздуха пропорционально перепаду давления, измеряемого вакуумметром 8, перепад давления создается мерным соплом 7, установленным на входе во входной ресивер 6.

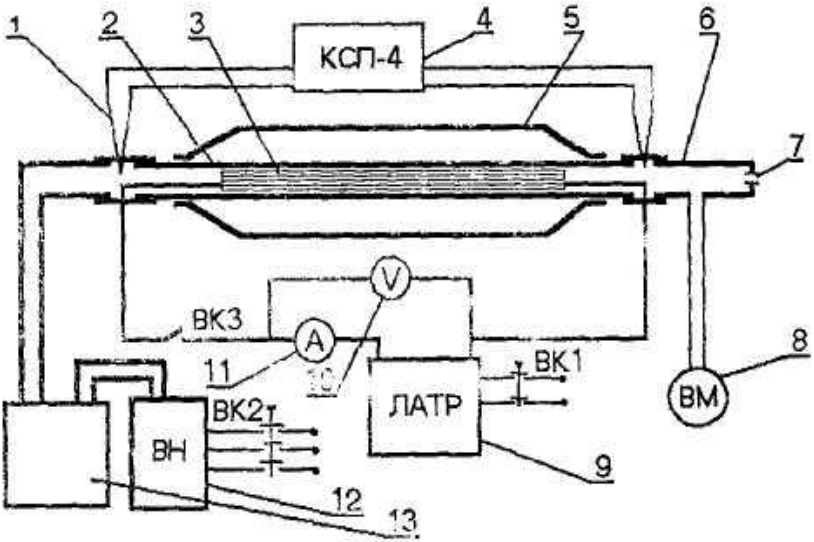

Рис. 5.1. Схема электрокалориметра:
1 – термопара; 2 – трубка калориметра; 3 – электроспираль;
4 – потенциометр; 5 – оболочка калориметра; 6 – входной ресивер;
7 – мерное сопло; 8 – вакуумметр; 9 – лабораторный автотрансформатор;
10 – вольтметр; 11 – амперметр; 12 – вакуумный насос; 13 – выходной ресивер

В установке, кроме перечисленных приборов, используются амперметр 11 и вольтметр 10 переменного тока, лабораторный автотрансформатор 9, барометр, термометр для измерения температуры атмосферного воздуха, потенциометр 4 для измерения термо-ЭДС термопары.

5.5. Порядок выполнения работы

1) Перед включением вакуумного насоса необходимо замерить диаметр мерного сопла.

2) Включить вакуумный насос, потенциометр и автотрансформатором установить мощность спирали нагревателя для первой серии опыта в пределах 10...15 Вт.

3) Через калориметр пропускается воздух до тех пор, пока не стабилизируются показания потенциометра.

4) После стабилизации параметров потока воздуха

снимают показания вакуумметра Δp, температуры t_0 и давления p_0 окружающего воздуха, значения тока I, напряжения U и показания разности температур Δt_B по потенциометру.

5) Замеры делают не менее трех раз через 1...2 мин.

6) Результаты показаний приборов записывают в таблицу 5.1.

Таблица 5.1

Результаты измерений

№ опыта	Параметры нагревателя		Δp, Па	p_0, Па	t_0, ^{0}C	Δt_B, ^{0}C
	I, A	V, B				

5.6. Обработка результатов измерений

1) Определить количество теплоты, подведенной к воздушному потоку в единицу времени:

$$Q = I \cdot U, \text{ Вт или Дж/с} \qquad (5.14)$$

2) Действительный расход воздуха определяют по формуле

$$m_B = \rho_B \cdot S_C \cdot \mu \cdot \Delta p^{0,5}, \text{ кг/с} \qquad (5.15)$$

где ρ_B – плотность воздуха перед калориметром в ресивере, кг/м^3;

S_C – сечение сопла, м^2;

$\mu = 0,96$ – коэффициент расхода воздуха.

11) Плотность воздуха рассчитывается из уравнения состояния, которое выглядит следующим образом:

$$\rho_B = \frac{p_0 - \Delta p}{R_B \cdot T_0}, \text{ кг/м}^3 \qquad (5.16)$$

где $R_B = 287,08$ Дж/кг·К – индивидуальная газовая постоянная воздуха;

T_0 – температура окружающего воздуха, К.

12) Определить среднюю удельную изобарную теплоемкость воздуха для интервала температур $T_0 – T$:

$$c_P = \frac{Q}{m_B \cdot \Delta T}, \text{ кДж/кг·К} \qquad (5.17)$$

13) Считая воздух идеальным газом и воспользовавшись уравнением Майера, найти среднюю удельную изохорную теплоемкость воздуха:

$$c_v = c_P - R_B, \text{ кДж/кг·К} \qquad (5.18)$$

14) Результаты расчетов сводят в таблицу 5.2.

Таблица 5.2

Результаты расчетов

№ опыта	Q, Дж/с	ρ_B, кг/м^3	m_B, кг/с	c_P, Дж/кг·К	c_V, Дж/кг·К

5.7. Оформление отчета

Отчет по работе должен включать цель работы, задачи работы, схему и описание лабораторной установки, таблицы измерений и результатов вычислений.

5.8. Контрольные вопросы

1) Что называют удельной теплоемкостью вещества или газа, от чего она зависит?

2) Что такое истинная теплоемкость вещества или газа?

3) Как определяется средняя теплоемкость для данного интервала температур?

4) Чем выражается количество теплоты на графике зависимости теплоемкости от температуры?

5) Как выражается связь между изобарной и изохорной теплоемкостями?

Лабораторная работа №6

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ АДИАБАТЫ ВОЗДУХА

6.1. Цель работы

Закрепление знаний в теории исследования термодинамических процессов, ознакомление с методикой опытного определения показателя адиабаты реальных газов, получение навыков в проведении теплотехнического эксперимента.

6.2. Задачи работы

Экспериментальное определение численного значения показателя адиабаты воздуха и ознакомление с методами обработки результатов эксперимента.

6.3. Теоретические положения

Адиабатный процесс – это процесс изменения состояния идеального газа, протекающий без теплообмена с окружающей средой:

$$\Delta q=0 \qquad (6.1)$$

Адиабатный процесс является одним из наиболее часто встречающихся на практике термодинамическим процессом изменения состояния рабочего тела.

Уравнение адиабатного процесса имеет вид [1]:

$$pv^k = const \qquad (6.2)$$

где k – показатель адиабаты, равный отношению изобарной теплоемкости C_P к изохорной C_V:

$$k = \frac{C_P}{C_V} > 1 \qquad (6.3)$$

Численное значение показателя адиабаты для идеального газа можно получить исходя из молекулярно-кинетической теории газов:

для одноатомного газа k = 1,66;

для двухатомного газа k = 1,4;

для многоатомного газа k = 1,33.

Для идеальных газов величина k является постоянной, не зависящей от параметров состояния газа.

Связь между изобарной и изохорной теплоемкостями устанавливает уравнение Майера:

$$C_P - C_V = R \qquad (6.4)$$

Выразив C_P из формулы (6.4), формулу (6.3) можно привести к виду:

$$k = \frac{C_P}{C_V} = \frac{C_V + R}{C_V} = 1 + \frac{R}{C_V} \qquad (6.5)$$

Поскольку для реальных газов теплоемкость C_V возрастает с увеличением температуры интенсивнее, чем C_P, то значение k с увеличением температуры уменьшается. Величина k для реальных газов одной атомности при прочих равных условиях имеет отличия. Так, например, для двухатомных газов: водород k = 1,41; азот k = 1,404; воздух k = 1,4.

Допустим, что условия опыта с достаточной степенью точности удовлетворяют уравнению состояния идеального газа:

$$p\,v = M \cdot R \cdot T \qquad (6.6)$$

Представим сосуд, заполненный газом, имеющим параметры: давление P_1 и температуру T_1, превышающие параметры окружающей среды. За счет охлаждения стенок сосуда окружающей средой и отвода некого количества теплоты q_1, температура газа станет равной температуре окружающей среды – T_2, а давление снизится до некого значения P_2 (процесс 1-2 рис. 6.1). Затем быстро выпустим газ из резервуара,

соблюдая тем самым условия адиабатного расширения – отсутствие теплообмена с окружающей средой.

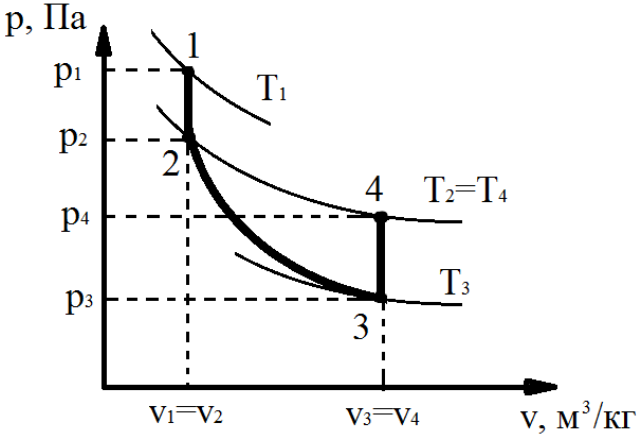

Рис. 6.1. К определению показателя адиабаты

В конце процесса 2-3 давление в сосуде станет равным давлению окружающей среды P_3, а температура понизится до T_3, меньше T_2. Закроем сосуд и выждем некоторое время, в течение которого от окружающей среды к более холодному телу будет подведена теплота q_2 (процесс 3-4).

В результате температура возрастет до температуры окружающей среды ($T_4 = T_2$), а давление повысится до некоторого значения P_4.

Учитывая уравнение адиабатного процесса (6.2) можно записать:

$$\frac{p_3}{p_2} = \frac{v_2^{\,k}}{v_3^{\,k}} = \left(\frac{v_2}{v_3}\right)^k \qquad (6.7)$$

Логарифмируя выражение (6.11) запишем:

$$ln\frac{p_3}{p_2} = k \cdot ln\frac{v_2}{v_3} \qquad (6.8)$$

Выведем отсюда k:

$$k = \frac{ln(p_3 / p_2)}{ln(v_2 / v_3)} = \frac{ln(p_3 / p_2)}{ln(v_2 / v_4)} \qquad (6.9)$$

Так как $T_2 = T_4$, можно предположить, что по линии 2-4 протекает условный изотермический процесс (T=const), которому соответствует выражение:

$$\frac{v_2}{v_4} = \frac{p_4}{p_2} \qquad (6.10)$$

С учетом выражения 6.10 уравнение 6.9 примет вид:

$$k = \frac{ln(p_3 / p_2)}{ln(p_4 / p_2)} \qquad (6.11)$$

6.4. Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка (рис. 6.3.) состоит из ресивера 6, в котором с помощью компрессора 3 создается избыточное давление, измеряемое чашечным манометром 7.

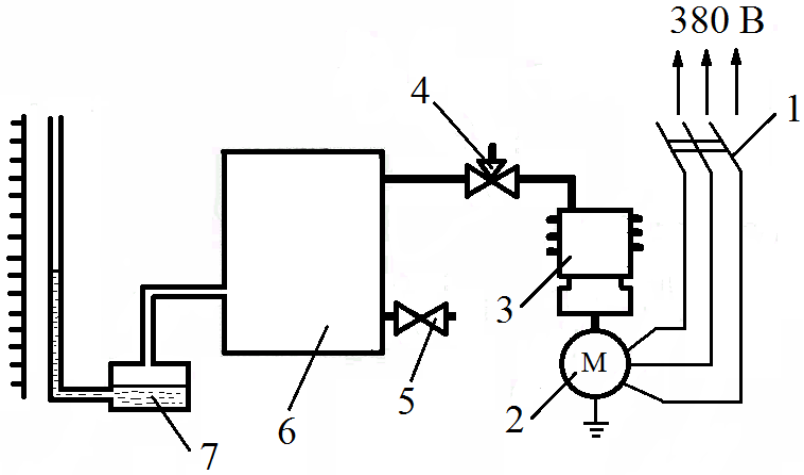

Рис. 6.3. Схема экспериментальной установки: 1 – рубильник; 2 – электродвигатель; 3 – компрессор; 4 – трехходовой кран; 5 – быстродействующий кран; 6 – ресивер; 7 – жидкостный чашечный манометр

На линии нагнетания от компрессора к ресиверу расположен трехходовой кран 4. Выпуск сжатого воздуха из ресивера производится через кран 5. Привод компрессора осуществляется от электродвигателя 2, питающегося трехфазным током. Силовая сеть имеет рубильник 1.

Трехходовой кран в работе занимает два положения. В одном из них производится нагнетание воздуха в ресивер, во втором – сжатый воздух из компрессора уходит в атмосферу, при этом ресивер отключается от нагнетательной линии.

6.5. Порядок проведения работы.

1) Убедиться по показанию манометра, что в ресивере нет избыточного давления. В противном случае выпустить из ресивера воздух через кран 5.

2) Перекрыть кран 5. Кран 4 поставить в положение, при котором сжатый воздух из компрессора будет поступать в ресивер.

3) Включить электродвигатель компрессора и, наблюдая за показанием чашечного манометра, закачать воздух в ресивер до давления, требуемого в опыте $Р_{ИЗБ.1}$. Каждая серия опытов производится 3 раза для различных начальных давлений. Общее количество опытов равно 9. Численные значения начальных давлений принять равными 800, 700 и 600 мм вод.ст. (примерно 8, 7 и 6 кПа соответственно)

4) По достижении заданного давления $Р_{ИЗБ.1}$ поворотом крана 4 направить воздушный поток от компрессора в атмосферу. Отключить электродвигатель.

5) Выждав 5-7 минут, необходимых для охлаждения сжатого воздуха до температуры окружающей среды (о наступлении этого момента будет свидетельствовать установившееся показание манометра $Р_{ИЗБ.2}$). Записать значение давления $Р_{ИЗБ.2}$ в протокол.

6) Открыть кран 5 на время не более 2 секунд и выпустить сжатый воздух из ресивера в атмосферу. При этом $Р_{ИЗБ.3}$ станет равным нулю ($Р_{ИЗБ.3}=0$). Закрыть кран.

7) После 5…7 минут охладившийся при адиабатном расширении воздух прогреется до температуры окружающей среды и давление повысится до $Р_{ИЗБ.4}$, значение которого занести в протокол.

6.6. Обработка полученных данных и оформление отчета

1) Для каждого опыта определить абсолютное давление воздуха в начале изохорного процесса снижения давления с отводом теплоты ($Р_{АБС.1}$), в начале адиабатного расширения $Р_{АБС.2}$, в конце адиабатного расширения $Р_{АБС.3}$, в конце изохорного повышения давления с подводом теплоты $Р_{АБС.4}$ по следующей формуле:

$$P_{АБС.i} = 9{,}8 \cdot P_{ИЗБ.i} + P_{БАР}, \text{ Па} \qquad (6.12)$$

где $Р_{БАР}$ – атмосферное давление, Па;

$Р_{ИЗБ.i}$ – избыточное давление по манометру, мм вод. ст.

2) Используя выражение (6.11) вычислить значение показателя адиабаты k:

$$k = \frac{ln \frac{p_{АБС.3}}{p_{АБС.2}}}{ln \frac{p_{АБС4}}{p_{АБС2}}} \qquad (6.13)$$

3) Определить среднее значение показателя адиабаты воздуха для серии проводимых опытов:

$$k = \frac{1}{n} \sum_{1}^{n} k_i \qquad (6.14)$$

где n – количество опытов

6.7. Оформление отчета

Отчет по работе должен включать цель работы, задачи работы, схему установки, данные замеров, расчеты. Данные экспериментов свести в таблицу опытных данных (табл. 6.1.)

Таблица 6.1.

Опытные данные

№ опыта	Давление в ресивере								Показатель адиабаты k_i
	по манометру, мм вод. ст.			абсолютное давление, Па					
	$P_{ИЗБ.1}$	$P_{ИЗБ.2}$	$P_{ИЗБ.4}$	$P_{АБС.1}$	$P_{АБС.2}$	$P_{АБС.3}$	$P_{АБС.4}$	$P_{БАР}$	
1									
2									
3									
…									
9									

6.8. Контрольные вопросы

1. Что представляет собой адиабатный процесс идеального изменения состояния газа?

2. Как зависят между собой k, C_P, C_V.

3. От каких параметров состояния идеального и реального газов зависит k?

4. Как влияет температура на значение k идеального и реального газов?

Лабораторная работа №7

ИЗУЧЕНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ИЗМЕНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ИДЕАЛЬНЫХ ГАЗОВ

7.1. Цель работы

Изучить основные термодинамические процессы изменения состояния идеального газа и порядок определения термодинамических параметров, характеризующие тот или иной процесс.

7.2. Задачи работы

Научиться определять параметры идеальных газов при изменении их состояния в различных термодинамических процессах.

7.3. Теоретические положения

К основным термодинамическим процессам относят следующие четыре процесса:

изохорный – при постоянном объеме (v = const);

изобарный – при постоянном давлении (p = const);

изотермический – при постоянной температуре (T = const);

адиабатный – без теплообмена с внешней средой (Δq = 0).

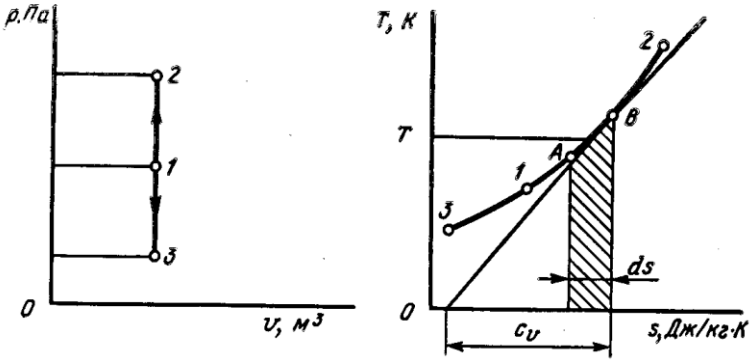

Рис. 7.1 Графическое изображение изохорного процесса

На рисунках 7.1 – 7.4 показаны графические изображения основных термодинамических процессов изменения состояния идеальных газов в *p*-*v* и *T*-*s* координатах.

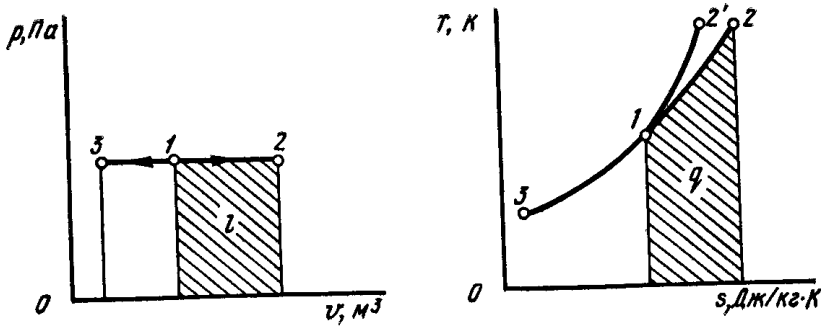

Рис. 7.2 Графическое изображение изобарного процесса

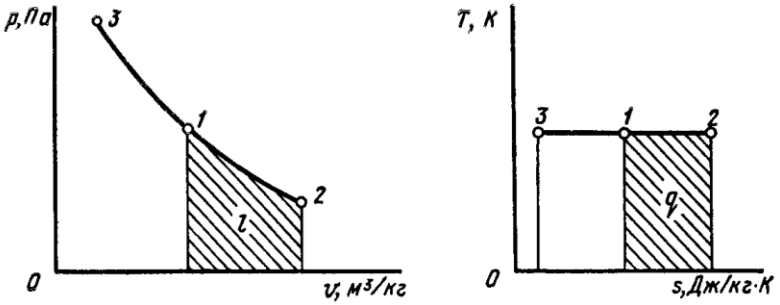

Рис. 7.3 Графическое изображение изотермического процесса

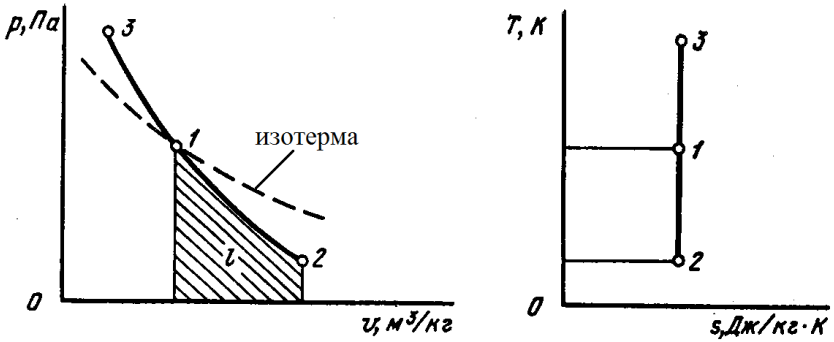

Рис. 7.4 Графическое изображение адиабатного процесса

В реальных условиях указанные ограничения практически не выполняются. В связи с этим в технической термодинамике существует понятие *политропного* процесса как общего случая термодинамического процесса. Предполагается, что политропный процесс обратим и теплоемкость рабочего тела (идеального газа) $C_П$ в ходе данного процесса не изменяется.

В таблицах 7.1. и 7.2 представлены формулы для расчета характеристик основных термодинамических процессов изменения состояния идеальных газов. При составлении этой таблицы было принято, что количество рабочего тела равно 1 кг, теплоемкость газа постоянна и четыре основных термодинамических процесса являются частными случаями политропного процесса при соответствующих значениях «n».

Таблица 7.1

Характеристики изохорного, изобарного и изотермического процессов идеального газа

Характеристика процесса	Название процесса		
	Изохорный	Изобарный	Изотермический
Показатель политропы «n»	$n = \infty$	$n = 0$	$n = 1$
Уравнение процесса	$v = const;$ $\frac{p}{T} = const$	$p = const;$ $\frac{v}{T} = const$	$T = const;$ $p \cdot v = const$
Теплоемкость, кДж/(кг·К)	C_V	$C_P = C_V + R$	∞
Изменение внутренней энергии $\Delta u_{1\text{-}2} = u_2 - u_1$, кДж/кг	$\Delta u_{1\text{-}2} = C_V (T_2 - T_1)$	$\Delta u_{1\text{-}2} = C_V (T_2 - T_1)$	0
Изменение энтальпии $\Delta h_{1\text{-}2} = h_2 - h_1$, кДж/кг	$\Delta h_{1\text{-}2} = C_P (T_2 - T_1)$	$\Delta h_{1\text{-}2} = C_P (T_2 - T_1)$	0
Изменение энтропии $\Delta s_{1\text{-}2} = s_2 - s_1$, кДж/кг	$\Delta s_{1-2} = C_V \cdot ln \frac{T_2}{T_1}$	$\Delta s_{1-2} = C_P \cdot ln \frac{T_2}{T_1}$	$\Delta s_{1-2} = R \cdot ln \frac{v_2}{v_1} = R \cdot ln \frac{p_2}{p_1}$

Продолжение табл. 7.1

Характеристика процесса	Название процесса		
	Изохорный	Изобарный	Изотермический
Количество теплоты $q_{1\text{-}2}$, кДж/кг	$q_{1\text{-}2} = \Delta u_{1\text{-}2} = C_V (T_2 - T_1)$	$q_{1\text{-}2} = C_P (T_2 - T_1)$	$q_{1-2} = R \cdot T \cdot ln \frac{v_2}{v_1} = R \cdot T \cdot ln \frac{p_1}{p_2}$
Работа изменения объема $l_{1\text{-}2}$, кДж/кг	0	$l_{1\text{-}2} = P \cdot (v_2 - v_1) = R \cdot (T_2 - T_1)$	$l_{1-2} = R \cdot T \cdot ln \frac{v_2}{v_1} = R \cdot T \cdot ln \frac{p_1}{p_2}$
Работа техническая $l'_{1\text{-}2}$, кДж/кг	$l'_{1\text{-}2} = -v(P_2 - P_1) = -R(T_2 - T_1)$	0	$l'_{1-2} = R \cdot T \cdot ln \frac{v_2}{v_1} = R \cdot T \cdot ln \frac{p_1}{p_2}$

Таблица 7.2

Характеристики адиабатного и политропного процессов идеального газа

Характеристика процесса	Наименование процесса	
	Адиабатный	Политропный
Показатель политропы «n»	$n = k = \frac{C_p}{C_V} > 1$	$n = \frac{C_П - C_P}{C_П - C_V}$
Уравнение процесса	$p \cdot v^k = const$	$p \cdot v^n = const$
Теплоемкость, кДж/(кг·К)	0	$C_П = C_V \frac{n-k}{n-1}$
Изменение внутренней энергии $\Delta u_{1\text{-}2} = u_2 - u_1$, кДж/кг	$\Delta u_{1\text{-}2} = C_V(T_2 - T_1)$	$\Delta u_{1\text{-}2} = C_V(T_2 - T_1)$
Изменение энтальпии $\Delta h_{1\text{-}2} = h_2 - h_1$, кДж/кг	$\Delta h_{1\text{-}2} = C_P(T_2 - T_1)$	$\Delta h_{1\text{-}2} = C_P(T_2 - T_1)$
Изменение энтропии $\Delta s_{1\text{-}2} = s_2 - s_1$, кДж/кг	0	$\Delta s_{1-2} = C_П ln\frac{T_2}{T_1} = C_V \frac{n-k}{n-1} ln\frac{T_2}{T_1} = C_V ln\frac{T_2}{T_1} + R \cdot ln\frac{v_2}{v_1}$

Продолжение табл. 7.2

Характеристика процесса	Наименование процесса	
	Адиабатный	Политропный
Количество теплоты q_{1-2}, кДж/кг	0	$q_{1-2} = C_{II}(T_2 - T_1) = C_V \frac{n-k}{n-1}(T_2 - T_1)$
Работа изменения объема l_{1-2}, кДж/кг	$l_{1-2} = \frac{1}{k-1}(p_1 \cdot v_1 - p_2 \cdot v_2) = \frac{R \cdot T_1}{k-1}\left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right]$	$l_{1-2} = \frac{1}{n-1}(p_1 \cdot v_1 - p_2 \cdot v_2) = \frac{R \cdot T_1}{n-1}\left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}\right]$
Работа техническая l'_{1-2}, кДж/кг	$l_{1-2} = \frac{k}{k-1}(p_1 \cdot v_1 - p_2 \cdot v_2) = \frac{k}{k-1} R \cdot T_1\left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right]$	$l_{1-2} = \frac{n}{k-1}(p_1 \cdot v_1 - p_2 \cdot v_2) = \frac{n}{n-1} R \cdot T_1\left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}\right]$

7.4. Порядок выполнения работы

1) Получить у преподавателя исходные данные: название газа, тип термодинамического процесса, начальные и конечные значения параметров газа, значение показателя процесса.

2) Определить начальный объем заданного газа по формуле:

$$v_1 = \frac{R \cdot T_1}{p_1}, \text{ м}^3/\text{кг} \qquad (7.1)$$

где $T_1 = t_1 + 273$, К;

R – индивидуальная газовая постоянная заданного газа (см. приложение 2)

3) Определить конечные параметры заданного газа, используя следующие уравнения:

а) Изохорный процесс:

$$v_1 = v_2 \quad \text{и} \quad \frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2} \qquad (7.2)$$

б) Изобарный процесс:

$$p_1 = p_2 \quad \text{и} \quad \frac{v_1}{T_1} = \frac{v_2}{T_2} \qquad (7.3)$$

в) Изотермический процесс:

$$T_1 = T_2 \quad \text{и} \quad p_1 \cdot v_1 = p_2 \cdot v_2 \qquad (7.4)$$

г) Адиабатный процесс:

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^k \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{k-1} \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} \qquad (7.5)$$

д) Политропный процесс:

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^n \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{n-1} \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} \qquad (7.6)$$

4) Используя формулы в таблице 7.2 определить характеристики заданного процесса:

а) Теплоемкость газа (теплоемкости C_V и C_P выбирают по приложению 3)

б) Изменение внутренней энергии $\Delta u_{1\text{-}2}$.

в) Изменение энтальпии $\Delta h_{1\text{-}2}$.

г) Изменение энтропии $\Delta s_{1\text{-}2}$.

д) Количество теплоты $q_{1\text{-}2}$.

е) Работу изменения объема $l_{1\text{-}2}$

7.5. Оформление отчета

Отчет по работе должен включать цель работы, задачи работы, результаты вычислений.

7.6. Контрольные вопросы

1. Рассказать условия протекания основных термодинамических процессов.
2. Привести уравнения состояния основных термодинамических процессов.
3. Нарисовать и объяснить график конкретного термодинамического процесса, указанного преподавателем.
4. Как определяется количество теплоты в конкретном термодинамическом процессе (по указанию преподавателя)?

Лабораторная работа № 8

ИЗУЧЕНИЕ ХОЛОДИЛЬНОЙ УСТАНОВКИ И ИСПЫТАНИЕ ТЕПЛООБМЕННИКА – ОХЛАДИТЕЛЯ МОЛОКА

8.1. Цель работы

Усвоение принципа действия компрессионной холодильной установки и методики испытания теплообменных аппаратов.

8.2. Задачи работы

Ознакомление с принципом действия и устройством холодильной установки и охладителя молока, входящих в комплекс доильного агрегата. Определение коэффициента теплопередачи теплообменника – охладителя молока.

8.3. Теоретические положения

В сельском хозяйстве наибольшее распространение получили машинные способы охлаждения, которые основаны на передаче тепла от менее нагретого тела к более нагретому. В большинстве холодильных машин, кроме установок воздушного охлаждения, такой перенос тепла осуществляется при помощи холодильного агента – вещества, имеющего низкую температуру кипения при нормальном атмосферном давлении.

Все холодильные машины разделяют на две группы. Первую составляют воздушные и паровые компрессионные холодильные машины, требующие для своей работы затрат механической энергии, а вторую – абсорбционные и пароэжекторные установки, работа которых основана на использовании тепловой энергии.

На рис. 8.1 представлены принципиальная схема паровой компрессионной холодильной установки и диаграмма термодинамического цикла в Ts-координатах.

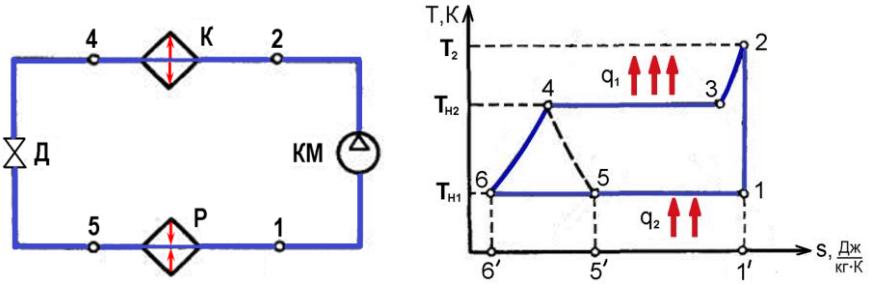

Рис. 8.1. Схема компрессионной паровой холодильной установки и изображение цикла в Ts-координатах: КМ – компрессор; Р – рефрижератор; Д – дроссельный клапан; К – конденсатор.

Цикл холодильной установки работает следующим образом:

1) Из рефрижератора «Р» влажный насыщенный пар со степенью сухости x_1 при давлении p_1 и температуре T_{H1} всасывается компрессором «КМ» и сжимается адиабатно (процесс 1-2) до давления p_2 и температуры T_2.

2) Из компрессора пар подается в конденсатор «К», где, охлаждаясь водой или окружающим воздухом, при постоянном давлении p_2 превращается вначале в сухой насыщенный пар (процесс 2-3), а затем полностью переходит в жидкость (процесс 3-4).

На T-s-диаграмме теплота q_1, отданная рабочим телом в конденсаторе, эквивалентна площади: *2-3-4-5-5′-1′-2*.

3) На выходе из конденсатора жидкое рабочее тело, проходя через клапан «Д», дросселируется (на диаграмме этот процесс условно изображен линией 4-5).

4) После дроссельного клапана рабочее тело поступает в рефрижератор. В результате подвода теплоты q_2, хладоагент испаряется до состояния, изображаемого точкой 1 (процесс 5-1).

На T-s-диаграмме подведенная теплота q_2 эквивалентна площади: 5-1-1′-5′-5.

8.4. Описание опытной установки

Технологическая схема компрессионной холодильной установки изображена на рис. 8.2. Установка включает три

контура: контур движения молока, контур движения охлаждающей воды и контур движения фреона.

Теплообменник – охладитель молока 1 служит для охлаждения парного молока водой. Проходя по теплообменнику, молоко охлаждается, т.к. отдает свою теплоту холодной воде, которая в свою очередь нагревается. Вода играет роль промежуточного теплоносителя. Теплообменник выполнен по противоточной схеме, поэтому молоко может быть охлаждено в нем до 4-5 °С. По конструкции теплообменник – пластинчатый.

Нагретая вода поступает в ванну 2 посредством насоса 7. В ванну с водой погружен испаритель 6, который содержит ряд пластинчатых элементов, соединенных коллекторами, через которые подается фреоновая жидкость. В испарителе фреон превращается в пар, забирая теплоту от нагретой воды, охлаждая ее, при этом до 0°С. В ванне накапливается определенное количество льда, и холодная вода всегда готова к использованию.

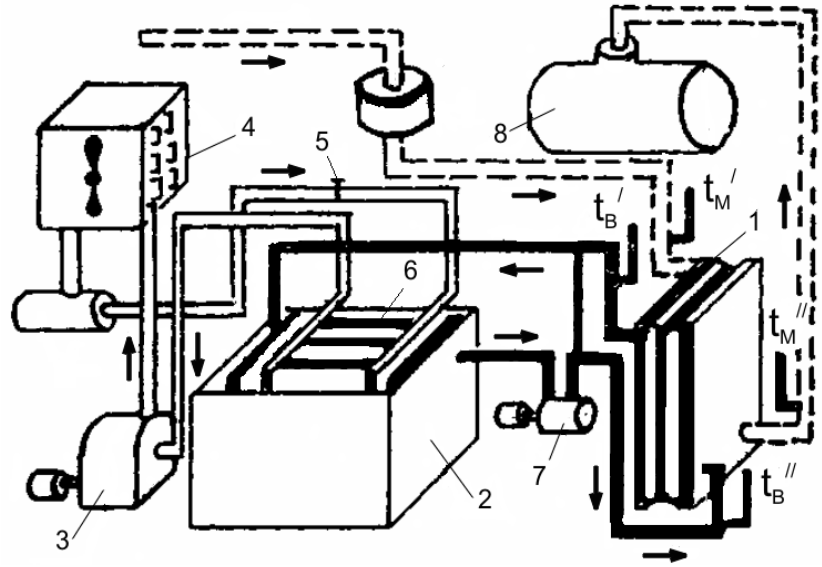

Рис. 8.2. Схема установки для охлаждения молока:
1 – теплообменник – охладитель молока, 2 – ванна, 3 – компрессор, 4 – конденсатор, 5 – дроссельный клапан (терморегулирующий вентиль), 6 – испаритель, 7 – водяной насос, 8 – емкость для охлажденного молока

Пары фреона из испарителя поступают в компрессор 3, где происходит сжатие фреона, при этом его температура становится выше температуры окружающей среды. В конденсаторе 4 фреон охлаждается до температуры окружающей среды и конденсируется. В дроссельном клапане (терморегулирующем вентиле) 5 давление жидкого фреона снижается, и температура насыщения паров становится ниже 0°С, т.е. снижается температура, при которой может произойти испарение фреона. И фреон снова поступает в испаритель, и цикл повторяется.

8.5. Проведение испытания

При испытании теплообменного аппарата 1 основными замеряемыми величинами являются величины, формирующие уравнения теплового баланса и теплопередачи теплообменника, т. е. расход молока $m_м$ (кг/с), начальные температуры молока $t_м^{/}$(^{0}С) и воды $t_B^{/}$(^{0}С) на входах теплообменника, конечные температуры молока $t_м^{//}$(^{0}С) и воды $t_B^{//}$(^{0}С) на выходах теплообменника.

Температуры в данном случае замеряются ртутными термометрами. Расход «молока» (заменяется при испытании теплой водой) и измеряется весовым методом.

8.6. Обработка результатов испытания

1) Определяем тепловой поток от молока к охлаждающей воде [1]:

$$Ф = m_м C_м (t_м^{/} - t_м^{//}), \text{ Вт} \qquad (8.1)$$

где $C_м$ = 3,8 кДж/кг·К – теплоемкость молока.

2) Определяем средний логарифмический температурный напор:

$$\Delta t_{СР} = \frac{\Delta t_Б - \Delta t_М}{\ln \frac{\Delta t_Б}{\Delta t_М}}, \ ^0\text{С} \qquad (8.2)$$

где $\Delta t_Б = t_м^{/} - t_B^{//}$, ^{0}С

$\Delta t_М = t_м^{//} - t_B^{/}$, ^{0}C

3) Из уравнения теплопередачи определяем коэффициент теплопередачи:

$$K = \frac{Q}{F \cdot \Delta t_{CP}}, \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К} \qquad (8.3)$$

где F – площадь поверхности теплообмена, м^2.

4) Определяем расход охлаждающей воды m_B из уравнения теплового баланса теплообменного аппарата [1]:

$$m_м \cdot C_м \cdot (t_м^{/} - t_м^{//}) = m_B \cdot C_B \cdot (t_B^{//} - t_B^{/}) \qquad (8.4)$$

где C_B = 4,19 кДж/кг·К – теплоемкость воды.

Тогда расход охлаждающей воды будет равен:

$$m_B = \frac{m_м \cdot C_м \cdot (t_м^{/} - t_м^{//})}{C_B \cdot (t_B^{//} - t_B^{/})}, \text{ кг/с} \qquad (8.5)$$

5) Начертить график распределения температур вдоль поверхности теплообмена рис.8.2.

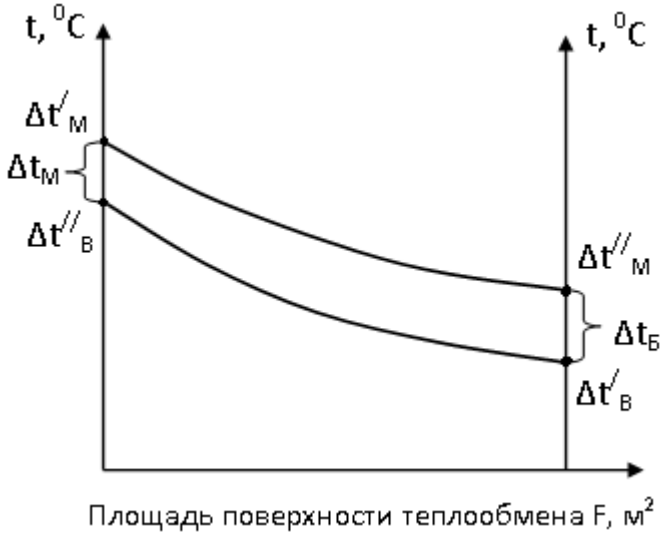

Рис. 8.2. График распределения температур вдоль поверхности теплообмена

8.6. Оформление отчета

Отчет по работе должен включать схему установки, таблицу опытных данных 8.1, расчет, схему изменения температур.

Таблица 8.1

Опытные данные

Измеряемые и расчетные величины							
$m_м$	m_B	$t'_м$	$t''_м$	t_B'	t_B''	$\Delta t_{ср}$	K

8.7. Контрольные вопросы

1. Какие типы холодильных установок используют в сельском хозяйстве.
2. Рассказать принцип работы лабораторной установки.
3. Какие основные величины определяют при испытании теплообменного аппарата.
4. По какому закону распределяется температура вдоль поверхности теплообмена.

Лабораторная работа №9

ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ТЕПЛООБМЕНА

9.1. Цель работы

Изучение процесса теплопроводности и характеризующих его величин. Ознакомление с законами распространения теплоты посредством теплопроводности и методами определения основных параметров при переносе теплоты через различные типы поверхностей.

9.2. Задачи работы

Научиться производить расчеты параметров при переносе теплоты через плоские и цилиндрические стенки в процессе теплопроводности.

9.3. Теоретические положения

Теплопроводность (кондуктивный теплообмен) – это процесс распространения теплоты за счет непосредственного соприкосновения тел (частиц тела) друг с другом. Она обусловлена движением микрочастиц (молекул) тела и возможна в твердых, жидких и газообразных средах.

Температурным полем называют совокупность значений температуры всех точек тела в данный момент времени. В общем случае уравнение температурного поля имеет вид:

$$t = f(x, y, z, \tau) \qquad (9.1)$$

где t – температура тела;

x, y, z – координаты точки;

τ – время.

Если температура зависит от времени, то температурное ноле называют ***нестационарным.*** Если температура тела нс изменяется с течением времени, то температурное поле называется ***стационарным***. Наиболее простой вид имеет уравнение одномерного стационарного температурного поля:

$$t = f(x) \qquad \frac{\partial t}{\partial \tau} = 0 \qquad \frac{\partial t}{\partial y} = \frac{\partial t}{\partial z} = 0 \qquad (9.2)$$

Изотермическая поверхность – это геометрическое место точек с одинаковыми температурами. Изотермические поверхности между собой никогда не пересекаются, они либо замыкаются на себя, либо кончаются на границах тела. Пересечение изотермических поверхностей плоскостью образует на ней семейство изотерм (рис. 9.1):

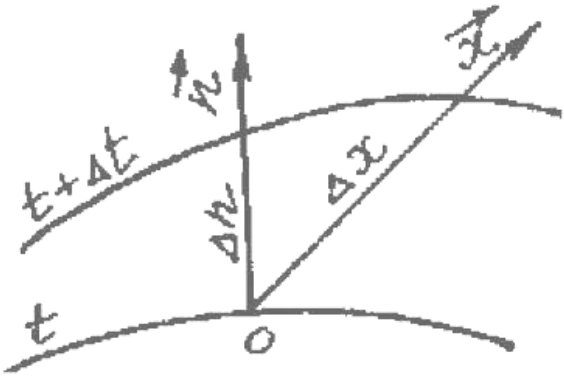

Рис. 9.1. К определению температурного градиента

Градиент температуры. Возрастание температуры в направлении нормали к изотермической поверхности характеризуется градиентом температуры:

$$grad(t) = n_0 \frac{\partial t}{\partial n} \qquad (9.3)$$

где n_0 – единичный вектор, направленный по нормали к изотермической поверхности в строну возрастания температуры;

$\frac{\partial t}{\partial n}$ – производная температуры по нормали *n*.

Градиент температуры есть вектор, направленный вдоль нормали к изотермической поверхности в сторону возрастания температуры, его единица измерения °С/м или *К/м.*

Тепловым потоком Ф называют количество теплоты переносимой через какую-либо поверхность в единицу времени.

Теплота самопроизвольно переносится только в сторону убывания температуры. Тепловой поток измеряют в Ваттах: Вт = Дж/с.

Удельный тепловой поток или ***плотность теплового потока q*** – это тепловой поток, отнесенный к единице поверхности ($м^2$). Единица измерения теплового потока: $Вт/м^2$ = $Дж/(с·м^2)$.

Закон Фурье

Основным законом теплопроводности является предложенная Ж. Фурье (1822 г.) и подтвержденная опытами гипотеза о пропорциональности удельного теплового потока градиенту температуры:

$$\vec{q} = -\lambda \cdot grad\,(t) \qquad (9.4)$$

где λ – коэффициент теплопроводности вещества.

Знак минус в уравнении (9.4) указывает на то, что теплота передается в направлении уменьшения температуры, т.е. в направлении, противоположном температурному градиенту (рис. 9.2).

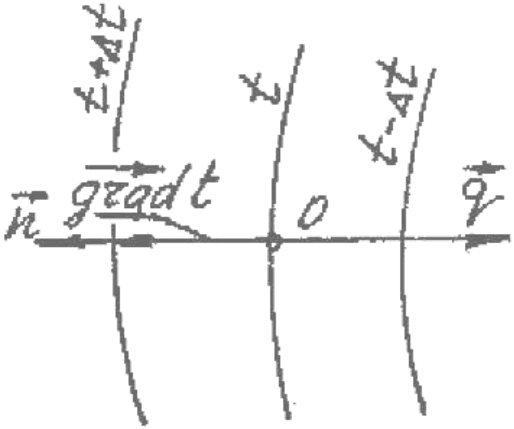

Рис. 9.2. К закону Фурье

Коэффициент теплопроводности – это физическая величина, характеризующая способность тела проводить теплоту. Числовое значение λ определяет количество теплоты, проходящей в единицу времени через единицу поверхности тела при температурном градиенте, равном единице. Коэффициент теплопроводности имеет единицу измерения - Вт/(м·К).

Значения коэффициента λ для различных веществ определяются из справочных таблиц, составленных на основании экспериментальных данных. Коэффициент λ

показывает, насколько хорошо проводит теплоту то или иное вещество.

Для большинства твердых тел зависимость λ от температуры близка к линейной:

$$\lambda = \lambda_0 \cdot [1 + b \cdot (t - t_0)] \qquad (9.5)$$

где λ – коэффициент теплопроводности при температуре t, *Вт/(м·К)*;

λ_0 – коэффициент теплопроводности при температуре t_0, *Вт/(м·К)*

b – константа, определяемая опытным путем.

Кроме температуры, λ зависит от химического состава, плотности, влажности и структуры материала.

Теплопроводность в плоской однослойной стенке при стационарном режиме

Стационарный режим – это установившийся тепловой режим, при котором температурное поле в рассматриваемом теле не меняется во времени при заданных граничных условиях. Все рассматриваемые стенки имеют однородную структуру.

Рассмотрим однослойную плоскую стенку толщиной δ (рис. 9.3), коэффициент теплопроводности которой постоянен и равен λ. Па наружных поверхностях стенки температуры постоянны и равны t_{C1} и t_{C2} Температурное поле стационарно и одномерно, температура внутри стенки изменяется только в направлении оси *x*. Изотермические поверхности плоские и располагаются перпендикулярно оси *x*.

На расстоянии *x* выделим внутри стенки слой толщиной *dx*, ограниченный двумя изотермическими поверхностями.

Уравнение Фурье для этого слоя принимает вид:

$$q = -\lambda \frac{dt}{dx} \quad \text{или} \quad dt = -\frac{q}{\lambda} dx \qquad (9.6)$$

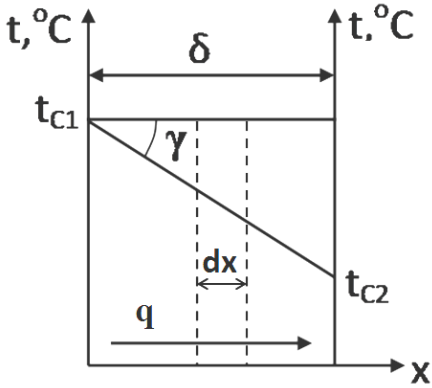

Рис. 9.3. Распределение температуры плоской стенке при *q = const*

Поскольку тепловой режим стационарен, величина *q* постоянна в каждом сечении. Тогда после интегрирования уравнения (9.6) получаем:

$$t = -\frac{q}{\lambda}x + C \qquad (9.7)$$

Постоянная интегрирования С определяется из граничных условий, а именно при $x = 0$: $t = t_{C1} = C$, а при x =δ: $t = t_{C2}$. Подставляя эти значения в уравнение (9.7), имеем:

$$t_{C2} = -\frac{q}{\lambda}\delta + t_{C1} \qquad (9.8)$$

Из уравнения (9.6) находим искомое значение удельного теплового потока *q*, а именно:

$$q = \frac{\lambda}{\delta}(t_{C2} - t_{C1}) = \frac{\lambda}{\delta}\Delta t \qquad (9.9)$$

Разность значений температуры $\Delta t = t_{C2} - t_{C1}$ называют *температурным напором.* Отношение λ/δ называется *тепловой проводимостью* стенки, а обратная величина δ/λ – *тепловым* или *термическим сопротивлением стенки.* Зная плотность теплового потока *q*, легко вычислить общее количество теплоты, которое передастся через поверхность стенки величиной *F* за промежуток времени τ:

$$\Phi = q \cdot F \cdot \tau = \frac{\lambda}{\delta}(t_{C2} - t_{C1}) \cdot A \cdot \tau \text{, Дж} \qquad (9.10)$$

Если в уравнение (9.7) подставить найденные значения С и *q*, то получим уравнение температурной кривой в *x*-*t*-координатах (рис. 9.3), которая позволяет найти значение температуры в любом слое по толщине стенки:

$$t_X = t_{C1} - \frac{(t_{C2} - t_{C1})}{\delta} \cdot x \qquad (9.11)$$

Последнее показывает, что при постоянном значении λ температура плоской стенки изменяется по линейному закону. В действительности же коэффициент теплопроводности является переменной величиной.

Теплопроводность в плоской многослойной стенке при стационарном режиме

Рассмотрим процесс теплопроводности перш плоскую многослойную стенку, состоящую из трех однородных слоев (рис. 9.4), Коэффициент теплопроводности каждого слоя равен соответственно $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$, а толщина слоев – δ_1, δ_2, δ_3**.** Принимаем, что контакт между слоями идеальный и температура на соприкасающихся поверхностях двух слоев одинакова. Обозначим температуры поверхностей слоев t_{C1}, t_{C2}, t_{C3}, t_{C4}. При стационарном режиме удельный тепловой поток *q* постоянен и для всех слоев одинаков.

На основании (9.9) для каждого слоя запишем:

$$\begin{cases} q = \dfrac{\lambda_1}{\delta_1}(t_{C1} - t_{C2}) \\ q = \dfrac{\lambda_2}{\delta_2}(t_{C2} - t_{C3}) \\ q = \dfrac{\lambda_3}{\delta_3}(t_{C3} - t_{C4}) \end{cases} \qquad (9.12)$$

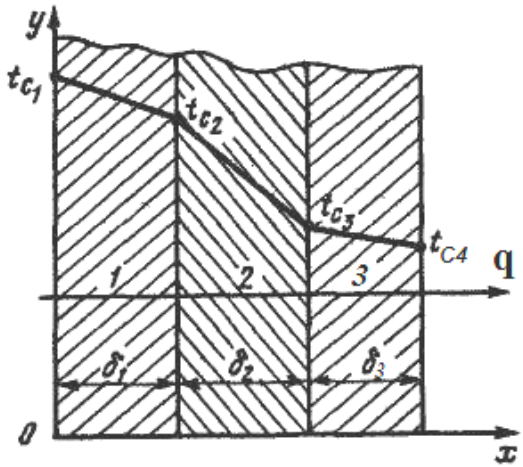

Рис. 9.4. Распределение температуры в многослойной стенке при $q = const$

Из этих уравнений выносим температурные напоры:

$$\begin{cases} t_{C1} - t_{C2} = \dfrac{q \cdot \delta_1}{\lambda_1} \\ t_{C2} - t_{C3} = \dfrac{q \cdot \delta_2}{\lambda_2} \\ t_{C3} - t_{C4} = \dfrac{q \cdot \delta_3}{\lambda_3} \end{cases} \qquad (9.13)$$

Складывая левые и правые части последних уравнений (9.13), получаем:

$$t_{C1} - t_{C4} = q\left(\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3}\right) \qquad (9.14)$$

Отсюда получим уравнение плотности теплового потока для трехслойной плоской стенки:

$$q = \frac{t_{C1} - t_{C4}}{\left(\dfrac{\delta_1}{\lambda_1} + \dfrac{\delta_2}{\lambda_2} + \dfrac{\delta_3}{\lambda_3}\right)} \qquad (9.15)$$

Для многослойной стенки, состоящей го «*n*» слоев, можно по аналогии записать:

$$q = \frac{t_{C1} - t_{C(n+1)}}{\sum_{1}^{n} \frac{\delta_i}{\lambda_i}} \qquad (9.16)$$

Зная температуры на наружных поверхностях стенки t_{C1} и t_{C4} можно найти температуры между слоями:

$$\begin{cases} t_{C2} = t_{C1} - \dfrac{q \cdot \delta_1}{\lambda_1} \\ t_{C3} = t_{C4} + \dfrac{q \cdot \delta_3}{\lambda_3} \end{cases} \qquad (9.17)$$

Теплопроводность в цилиндрической стенке при стационарном режиме

Рассмотрим теплопроводность через однослойную цилиндрическую стенку (трубу) длиной L, с внутренним радиусом d_1 и внешним d_2 (рис. 9.5). Коэффициент теплопроводности материала постоянен и равен λ. Внутренняя и внешняя поверхности трубы поддерживаются при постоянных температурах t_{C1} и t_{C2} ($t_{C1} > t_{C2}$).

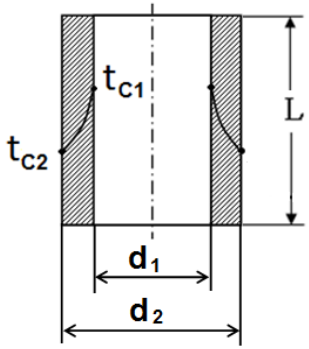

Рис. 9.5. Однородная цилиндрическая стенка

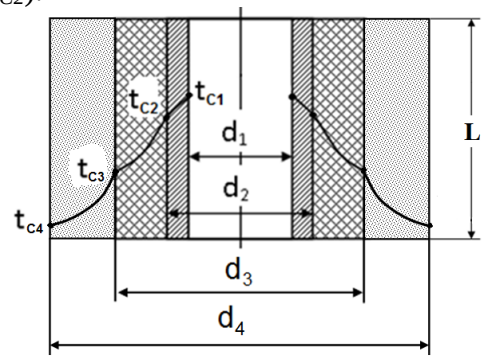

Рис. 9.6. Трехслойная цилиндрическая стенка

Тепловой поток $Ф$ направлен изнутри трубы наружу. Тепловой режим стационарен ($Ф = const$), температура изменяется только в радиальном направлении, а изотермические поверхности представляют собой цилиндры, имеющие с трубой общую ось.

Запишем уравнение теплового потока для цилиндрической однослойной стенки:

$$Ф = \frac{2\pi \cdot \lambda}{ln\frac{d_2}{d_1}} (t_{C1} - t_{C2}) \cdot L \qquad (9.18)$$

Удельный тепловой по ток, проходящий через стенку, может быть отнесен либо к единице длины L вдоль оси трубы, либо к единице внутренней F_1 или внешней F_2 поверхности трубы. При этом расчетные формулы соответственно принимают вид:

$$q_L = \frac{Ф}{L} = \frac{2\pi \cdot \lambda}{ln\frac{d_2}{d_1}} (t_{C1} - t_{C2}) \qquad (9.19)$$

$$q_{F1} = \frac{Ф}{F_1} = \frac{2\lambda}{d_1 \cdot ln\frac{d_2}{d_1}} (t_{C1} - t_{C2}) \qquad (9.20)$$

$$q_{F2} = \frac{Ф}{2F_2} = \frac{2\lambda}{d_2 \cdot ln\frac{d_2}{d_1}} (t_{C1} - t_{C2}) \qquad (9.21)$$

Уравнение температурной кривой внутри однослойной цилиндрической стенки имеет вид:

$$t_X = t_{C1} - \frac{Ф}{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot L} ln\frac{d_X}{1} = t_{C1} - \frac{t_{C1} - t_{C2}}{ln\frac{d_2}{d_1}} ln\frac{d_X}{d_1} \qquad (9.22)$$

В данном случае при постоянном значении λ температура изменяется по логарифмической кривой (рис. 9.5).

Рассмотрим цилиндрическую стенку, состоящую из трех слоев с диаметрами d_1, d_2, d_3 и d_4. Коэффициенты теплопроводности слоев λ_1, λ_2, λ_3. Обозначим температуры на

поверхностях слоев через t_{C1}, t_{C2}, t_{C3} и t_{C4}. В местах соприкосновения слоев (контакт идеальный).

При стационарном тепловом режиме через все слои проходит один и тот же тепловой поток Ф. Поэтому на основании (9.19) для каждого слоя можно написать:

$$\begin{cases} q_L = \dfrac{2\pi \cdot \lambda_1}{ln\dfrac{d_2}{d_1}}(t_{C1} - t_{C2}) \\ q_L = \dfrac{2\pi \cdot \lambda_2}{ln\dfrac{d_3}{d_2}}(t_{C2} - t_{C3}) \\ q_L = \dfrac{2\pi \cdot \lambda_3}{ln\dfrac{d_4}{d_3}}(t_{C3} - t_{C4}) \end{cases} \tag{9.23}$$

Исходя этих уравнений, запишем общее уравнение для удельного теплового потока через трехслойную цилиндрическую стенку:

$$q_L = \frac{\pi(t_{C1} - t_{C4})}{\dfrac{1}{2\lambda_1} ln\dfrac{d_2}{d_1} + \dfrac{1}{2\lambda_2} ln\dfrac{d_3}{d_2} + \dfrac{1}{2\lambda_3} ln\dfrac{d_4}{d_3}} \tag{9.24}$$

По аналогии с этим можно написать расчетную формулу для цилиндрической стенки, состоящей из «n» слоев:

$$q_L = \frac{\pi(t_{C1} - t_{C4})}{\sum\left(\dfrac{1}{2\lambda_i} ln\dfrac{d_{i+1}}{d_i}\right)} \tag{9.25}$$

Зная температуры на внешних поверхностях стенки t_{C1} и t_{C4} можно найти температуры между слоями:

$$\begin{cases} t_{C2} = t_{C1} - \dfrac{q_L}{\pi} \dfrac{1}{2\lambda_1} ln\dfrac{d_2}{d_1} \\ t_{C3} = t_{C4} + \dfrac{q_L}{\pi} \dfrac{1}{2\lambda_3} ln\dfrac{d_4}{d_3} \end{cases} \tag{9.26}$$

9.4. Порядок выполнения работы

1) Получить у преподавателя исходные данные: тип и размеры стенки (для плоской: ширину, высоту и толщину; для цилиндрической диаметры); материал слоев стенки; температуру внешних поверхностей стенки t_{C1} и t_{C4}.

2) Для заданных материалов слоев стенки определить коэффициенты теплопроводности слоев λ_1, λ_2, λ_3, используя приложения 4, 5 и 6.

3) Найти удельный тепловой поток:

а) для трехслойной плоской стенки по формуле (9.15)

б) для трехслойной цилиндрической стенки по формуле (9.24)

4) Найти полный тепловой поток:

а) для трехслойной плоской стенки:

$$\Phi = q \cdot F, \text{ Вт} \qquad (9.27)$$

б) для трехслойной цилиндрической стенки:

$$\Phi = q \cdot L, \text{ Вт} \qquad (9.28)$$

5) Найти температуру поверхностей между слоями t_{C2} и t_{C3}:

а) для трехслойной плоской стенки по формулам (9.17)

б) для трехслойной цилиндрической стенки по формуле (9.26).

9.5. Оформление отчета

Отчет по работе должен включать цель работы, задачи работы, результаты вычислений и поясняющие рисунки.

9.6. Контрольные вопросы

1. Что собой представляет процесс теплопроводности?
2. Что называют плотностью теплового потока?
3. Что такое градиент температуры?
4. Что такое температурное поле и изотермическая поверхность?
5. Что характеризует коэффициент теплопроводности?

Лабораторная работа № 10

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ ТРУБЫ

10.1. Цель работы

Закрепить знания в области теории теплопроводности, изучить методику экспериментального определения коэффициента теплопроводности изоляционных материалов, исследовать эффективность тепловой изоляции и получить навык в проведении экспериментальных работ.

10.2. Задачи работы

Ознакомление с теоретическими положениями, являющимися основой метода трубы; ознакомление с составом оборудования и принципом действия экспериментальной установки; определение значения коэффициента теплопроводности исследуемого материала; определение эффективности применения изоляционных материалов для снижения тепловых потерь при изоляции труб.

10.3. Теоретические положения

Самопроизвольный необратимый процесс переноса теплоты в пространстве при наличии разности температур называется теплообменом.

Теплопроводность (кондуктивный теплообмен) – это процесс распространения теплоты за счет непосредственного соприкосновении тел (частиц тела). Она обусловлена движением микрочастиц (молекул) тела и возможна в твердых, жидких и газообразных средах.

Основным законом теплопроводности является закон Фурье, который устанавливает количественную взаимосвязь

между тепловым потоком, вызванным тепловодностью, и температурными неоднородностями среды:

$$q = -\lambda \cdot grad(t) = -\lambda \cdot \frac{dt}{dx} \text{ , Вт/м} \qquad (10.1)$$

Согласно основному закону теплопроводности плотность теплового потока q прямо пропорциональна градиенту температуры *grad(t)*. Коэффициент пропорциональности λ (Вт/м·К) называется теплопроводностью, он характеризует способность материала проводить тепловую энергию. Коэффициент теплопроводности λ зависит от структуры вещества, его плотности, теплоемкости, температуры, давления.

Значение коэффициента теплопроводности определяется опытным путем на специальных лабораторных установках. В практических расчетах значения коэффициента теплопроводности для различных материалов можно взять из справочных материалов. В приложениях 4, 5 и 6 приведены значения коэффициента теплопроводности для некоторых материалов.

Одним из применяемых в теплотехнике методов определения λ является метод трубы или цилиндра. В случае установившегося теплового равновесия системы для многослойной стенки, состоящей из слоев разных материалов, уравнение теплового потока имеет вид:

$$\Phi = \frac{2\pi}{\sum_{1}^{n} \frac{1}{\lambda_i} \cdot \ln \frac{d_{i+1}}{d_i}} (t_1 - t_2) \cdot L \text{ , Вт/м} \qquad (10.2)$$

На теплообменные поверхности с целью уменьшения тепловых потерь накладывается тепловая изоляция из материалов с низкой теплопроводностью λ (газы, пористые материалы, асбест, минеральная вата, стекловата, пенопласт, пенобетон и другие). Часто на практике изолируются трубопроводы, по которым движутся горячие среды. На рис.10.1 изображена схема однослойной изоляции трубопровода.

В общем случае уравнение теплового потока на отрезке изолированного трубопровода длиной L, будет иметь вид, Вт:

$$\Phi = \frac{\pi \cdot L \cdot (t_{ж1} - t_{ж2})}{\frac{1}{\alpha_1 \cdot d_1} + \frac{1}{2 \cdot \lambda} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_{ИЗ}} \cdot \ln \frac{d_{ИЗ}}{d_2} + \frac{1}{\alpha_2 \cdot d_{ИЗ}}} \quad (10.3)$$

где λ и $\lambda_{ИЗ}$ – коэффициенты теплопроводности материала трубы и изоляции;

α_1 и α_2 – коэффициенты теплоотдачи от горячего теплоносителя с температурой $t_{ж1}$ к стенке трубы и от изоляции в окружающую среду с температурой $t_{ж2}$.

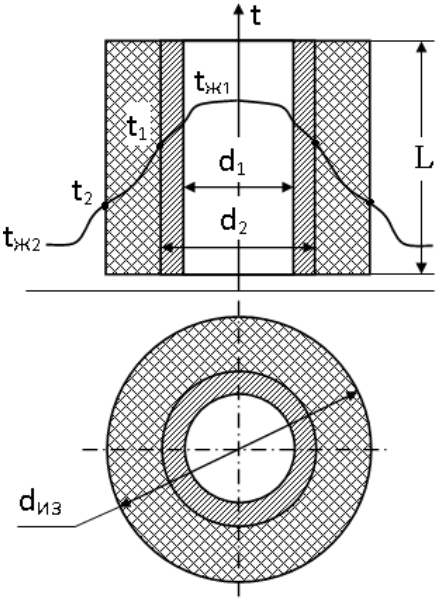

Рис. 10.1. Схема однослойной тепловой изоляции:
1 – горячая среда; 2 – стенка трубопровода; 3 – тепловая изоляция

При увеличении внешнего диаметра изоляции $d_{ИЗ}$ увеличивается сопротивление слоя изоляции $\frac{1}{2 \cdot \lambda_{ИЗ}} \cdot \ln \frac{d_{ИЗ}}{d_2}$, но одновременно уменьшается сопротивление теплоотдачи $\frac{1}{\alpha_2 \cdot d_{ИЗ}}$ на наружной поверхности изоляции.

Анализ общего термического сопротивления изолированной трубы позволяет выразить так называемый критический диаметр изоляции, при котором будут максимальные тепловые потери:

$$d_{KP} = 2 \cdot \frac{\lambda_{ИЗ}}{\alpha_2} \qquad (10.4)6$$

При $d_{ИЗ} < d_{KP}$ увеличение толщины изоляции приводит к увеличению теплопотерь, а при $d_{ИЗ} > d_{KP}$ – к уменьшению.

Рассчитанное значение критического диаметра должно быть меньше или равно наружному диаметру изолированной трубы, тогда изоляция будет эффективной:

$$d_{KP} \leq d_{ИЗ} \qquad (10.5)7$$

Решая это уравнение относительно значения коэффициента теплопроводности теплоизоляции, получим условие, когда теплопотери через изолированную цилиндрическую стенку будут наименьшими [6]:

$$\lambda_{ИЗ} \leq \frac{\alpha_2 \cdot d_2}{2} \qquad (10.6)8$$

10.4. Описание экспериментальной установки

Схема установки представлена на рис. 10.2 Экспериментальная установка состоит из металлической трубы 1, покрытой слоем исследуемого изоляционного материала 2, которым является асбест.

Нагрев трубы осуществляется нагревательным элементом 3, при этом для регулирования напряжения применяется лабораторный трансформатор ЛАТР 7. Для определения мощности, потребляемой нагревательным элементом, в цепь питания включен вольтметр 8.

Количество выделяемого в окружающую среду тепла через поверхность трубы определяется по расходу электрической энергии. Для снижения тепловых потерь торцы трубы закрыты тепловой изоляцией. Температура испытываемого материала измеряется десятью хромель-копелевыми термопарами.

Термопары 4 (пять штук) замеряют температуру на внутренней поверхности изоляции, а остальные пять термопар 5 – на наружной поверхности.

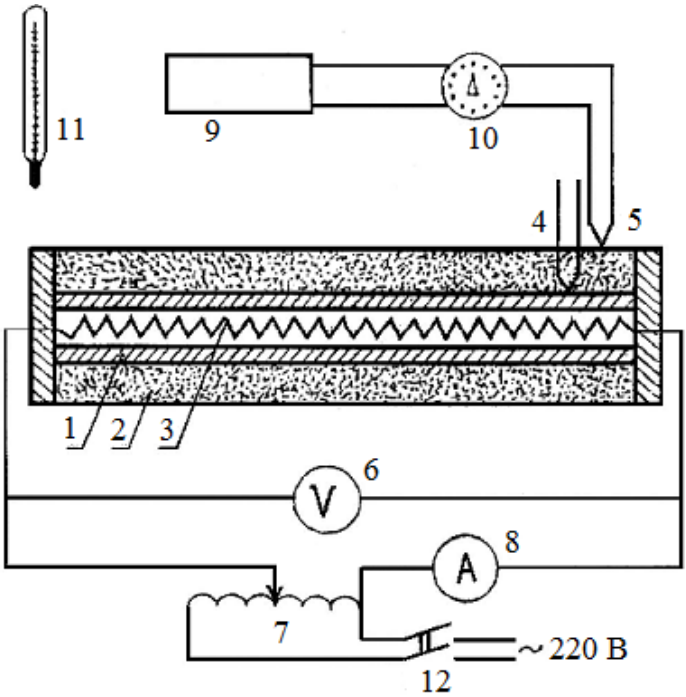

Рис. 10.2. Схема экспериментальной установки:
1 – металлическая труба; 2 – слой изоляции; 3 – нагревательный элемент; 4 – термопары на внутренней поверхности изоляции; 5 – термопары на наружной поверхности изоляции; 6 – вольтметр; 7 – автотрансформатор (ЛАТР); 8 – амперметр; 9 – измеритель температуры; 10 – переключатель термопар; 11 – ртутный термометр; 12 – выключатель сети

Вторичным прибором для измерения температуры является милливольтметр 9. Для последовательного подключения термопар к измерителю температур служит переключатель 10. Для определения температуры изоляции используется тот же измеритель. Измерение температуры окружающего воздуха проводится с помощью ртутного лабораторного термометра 11.

10.5. Порядок выполнения работы

Включение установки в сеть осуществляется выключателем 12 (рис.10.3) под наблюдением преподавателя или лаборанта. Устанавливается тепловой режим (задается значение напряжения, которое регулируется при помощи ЛАТРа 7). Все изменения проводятся при строго установившемся тепловом режиме. Фиксация установившегося режима происходит при неизменной средней температуры наружной t_2 и внутренней t_1 поверхности изоляции. При этом вся тепловая энергия, выделяемая нагревательным элементом в трубе, отдается в окружающую среду. Установившееся тепловое состояние наступает через 30…40 минут после включения установки. Показания термопар определяют, последовательно подключая их к милливольтметру 9 переключателем 10, повторяя замеры 2-3 раза через 5…10 минут. При этом режим можно считать установившемся, если измеряемые температуры поверхности изоляции двух последовательных опытов отличаются не более, чем на 5 ^{0}C.

10.6. Обработка экспериментальных данных

1) Вычислить количество теплоты, выделяемое нагревательным элементом:

$$Q = U \cdot I \text{, Вт} \qquad (10.7)$$

2) Вычислить среднюю температуру внутренней поверхности изоляционного слоя:

$$\bar{t}_1 = \frac{t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5}{5} \text{, }^0\text{C} \qquad (10.8)$$

3) Определить средняя температура наружной поверхности изоляционного слоя:

$$\bar{t}_2 = \frac{t_6 + t_7 + t_8 + t_9 + t_{10}}{5} \text{, }^0\text{C} \qquad (10.9)$$

4) Вычислить коэффициент теплопроводности для изоляционного материала:

$$\lambda_{ИЗ} = \frac{Q \cdot \ln \frac{d_3}{d_2}}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot (\bar{t}_1 - \bar{t}_2)}, \text{ Вт/м·К} \qquad (10.10)$$

Геометрические размеры изоляции равны:
диаметры трубы: $d_2 = 0{,}04$ м, $d_3 = 0{,}05$ м;
длина трубы: $L = 0{,}9$ м.

5) Определить коэффициент теплоотдачи от изоляции в окружающую среду:

$$\alpha_2 = \frac{Q}{\pi \cdot d_3 \cdot L \cdot (\bar{t}_2 - t_0)}, \text{ Вт/м·К} \qquad (10.11)$$

где t_0 – температура воздуха по показаниям лабораторного термометра.

6) Определить эффективность изоляции из соотношения (10.6)

7) Определить критический диаметр изоляции по формуле (10.5)

10.7 Оформление отчета

Отчет по работе должен включать цель работы, задачи работы, схему экспериментальной установки, таблицу 10.1 показаний термопар и таблицу 10.2 опытных и расчетных данных.

Таблица 10.1

Показания термопар

Номер опыта	Температура t, ^{0}C соответствующей термопары										Время замера τ, с
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	

Таблица 10.2

Опытные и расчетные данные

№ п/п	Параметр	Значение
1	Напряжение питания U, В	
2	Сила тока нагревателя I, А	
3	Тепловой поток от нагревателя Q, Вт	
4	Температура воздуха t_0, ^{0}C	
5	Средняя температура внутренней поверхности изоляции $\bar{t}_1$, ^{0}C	
6	Средняя температура внешней поверхности изоляции $\bar{t}_2$, ^{0}C	
7	Коэффициент теплоотдачи теплоизоляции α_2, Вт/м^2·К	
8	Коэффициент теплопроводности изоляции λ, Вт/м·К	
9	Критический диаметр изоляции d_{KP}, м	

10.8. Контрольные вопросы

1. Каков физический смысл теплопроводности?
2. Сформулировать основной закон теплопроводности – закон Фурье.
3. Что такое критический диаметр теплоизоляции?
4. Из каких составляющих складывается общее термическое сопротивление двухслойной цилиндрической трубы?

Лабораторная работа №11

ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООТДАЧИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯ ТЕПЛООБМЕНА

11.1. Цель работы

Изучение процесса теплоотдачи и характеризующих его величин. Ознакомление с законами распространения теплоты посредством теплоотдачи и методами определения основных параметров при переносе теплоты через различные типы поверхностей.

11.2. Задачи работы

Научиться производить расчеты параметров при переносе теплоты через плоские и цилиндрические стенки в процессе теплоотдачи.

11.3. Теоретические положения

Передача теплоты конвекцией осуществляется перемещением в пространстве неравномерно нагретых объемов газа, пара и капельной жидкости. В общем случае в теории конвективного теплообмена любая среда называется одним наименованием - жидкость.

Конвективным называется теплообмен, обусловленный совместным действием конвекции и теплопроводности.

Теплоотдачей называется конвективный теплообмен, происходящий:

– между теплоносителем и омываемой поверхностью (твердым телом, стенкой);

– между теплоносителем и жидкостью, газом.

Тепловой поток Φ, передаваемый конвекцией, определяется по закону Ньютона-Рихмана:

$$\Phi = q \cdot F = \alpha \cdot (t_C - t_Ж) \cdot A, \text{ Вт/м}^2 \qquad (11.1)$$

где α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м^2·К);

t_C *и* $t_Ж$ – соответственно температура поверхности (стенки) и жидкости, ^{0} С или *К*;

F – площадь поверхности теплообмена, $м^2$.

Главная трудность расчета по уравнению (11.1) заключается в определении *коэффициента теплоотдачи* α**,** зависящего от целою ряда факторов: физических свойств омывающей поверхность жидкости (плотности, вязкости теплоемкости, теплопроводности, природы возникновения и скорости движения среды, формы и размеров поверхности

Коэффициент α – величина сложная и ее невозможно определить теоретическим путем. Это связано со значительным влиянием на конвективный теплообмен *(теплоотдачу)* движения жидкости, которое подразделяется на *свободное и вынужденное.* Свободное движение среды происходит вследствие разности плотностей нагретых и холодных объемов жидкости, находящейся в гравитационном поле.

Свободное движение называют также *естественной конвекцией,* оно зависит от рода жидкости, разности температур и объема пространства, в котором происходит процесс.

Вынужденное движение среды возникает под действием *посторонних побудителей* (насоса, вентилятора, разности давлений и т.п,). В общем случае наряду с вынужденным движением одновременно может развиваться и свободное. Относительное влияние последнего тем больше, чем больше разность температур в отдельных точках жидкости и чем меньше скорость вынужденного движения.

Движение жидкости может быть ***ламинарным*** или ***турбулентным.*** При ламинарном режиме частицы жидкости движутся послойно, не перемешиваясь. Турбулентный режим характеризуется непрерывным перемешиванием всех слоев жидкости. При любом режиме движения частицы жидкости, непосредственно прилегающие к поверхности омываемого тела, как бы прилипают к ней. В результате вблизи обтекаемой

поверхности вследствие действия сил вязкости образуется тонкий слой заторможенной жидкости, в пределах которого скорость изменяется от нуля (на поверхности тела) до скорости невозмущенного потока (вдали от тела). Этот слой заторможенной жидкости получил название *гидродинамического пограничного слоя*.

Интенсивность переноса теплоты зависит от режима движения жидкости в пограничном слое. При турбулентном пограничном слое перенос теплоты в направлении перпендикулярном движению жидкости обусловлен турбулентным ее перемешиванием. Однако непосредственно у поверхности тела, в ламинарном подслое, а также в ламинарном пограничном слое теплота в указанном направлении передается в основном теплопроводностью.

Поэтому определение коэффициента α всегда базируется на экспериментальных данных. Однако результаты отдельных экспериментальных исследований должны быть обобщены с целью распространения на целую группу аналогичных или, как принято говорить, *подобных* явлений. Учение о подобных физических явлениях называется *теорией подобия.*

Основы теории подобия

Теория подобия применяется в технике как теоретическая основа для *моделирования* технических устройств, а также как *средство обобщения* результатов физического и математического эксперимента. Последнее непосредственно связано с определением коэффициента теплоотдачи α.

При изучении конвективного теплообмена (теплоотдачи) чаще всего пользуются следующими критериями подобия:

1) Критерий Нуссельта *Nu*:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda_{ж}} \qquad (11.3)$$

где l – характерный размер, м;

$\lambda_{ж}$ – коэффициент теплопроводности жидкости (см. приложение 7), Вт/(м·К).

Критерий Нуссельта *Nu* характеризует интенсивность теплообмена в пограничном слое между жидкостью и поверхностью омываемого тела.

2) Критерий Рейнольдса *Re*:

$$Re_{ж} = \frac{W \cdot l}{\nu_{ж}} \qquad (11.4)$$

где W – средняя скорость течения жидкости, м/с;

$\nu_{ж}$ – кинематический коэффициент вязкости жидкости при данной температуре среды $t_Ж$ (см. приложение 7), $м^2/с$;

Критерий Рейнольдса *Re* представляет собой отношение сил инерции к силам вязкости и определяет характер (режим) течения жидкости. Так, например, при $Re < 2300$ движение жидкости является ламинарным, при $Re > 10^4$ – режим турбулентный. Если $2300 < Re < 10^4$, имеет место переходный режим.

3) Критерий Прандтля *Pr:*

$$Pr = \frac{\mu \cdot C_P}{\lambda_{ж}} = \frac{\nu}{a} \qquad (11.5)$$

где μ - динамический коэффициент вязкости, $Н \cdot с/м^2$;

a – коэффициент температуропроводности жидкости при данной температуре, $м^2/с$;

C_P – изобарная массовая теплоемкость жидкости, кДж/(кг·К).

Критерии Прандтля *Pr* определяет физические свойства жидкости.

4) Критерий Грасгофа *Gr*:

$$Gr = \frac{g \cdot l^3}{\nu^2} \beta \cdot \Delta t \qquad (11.6)$$

где β – коэффициент объемного расширения жидкости (см. приложение 7), 1/К;

g – ускорение свободного падения, м/с^2

Δt – разность температур поверхности (стенки) и жидкости, между которыми происходит теплообмен, °С или К.

Критерий Грасгофа *Gr* характеризует соотношение подъемных сил, возникающих в жидкости при нагреве, и сил вязкости.

Для процессов конвективного теплообмена критериальное уравнение представляют в виде:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda_{ж}} = f\,(Re, Gr, Pr) \qquad (11.7)$$

Теплоотдача при обтекании плоской поверхности (пластины)

Когда температура поверхности пластины t_C и температура набегающего потока $t_{ж}$ различны, между поверхностью и потоком жидкости происходит процесс теплообмена. Согласно закону Ньютона-Рихмана тепловой поток пропорционален величине температурного напора $\Delta t = (t_C - t_{ж})$.

Коэффициент теплоотдачи α зависит от гидродинамической картины и режима течения жидкости, расстояния от передней кромки пластины и теплофизических свойств среды.

В результате обобщения многочисленных опытных данных по теплоотдаче при продольном обтекании пластины различными жидкостями были получены следующие критериальные уравнения:

1) При ламинарном режиме течения в пограничном слое ($Re < 4 \cdot 10^4$) для определения местного коэффициента теплоотдачи α_X критерий Нуссельта находят по формуле:

$$Nu_{хж} = 0{,}33 \cdot Re_{хж}^{0,5} \cdot Pr_{ж}^{0,33} \cdot \left(\frac{Pr_{ж}}{Pr_C}\right)^{0,25} \qquad (11.8)$$

Критерии Прандтля и Рейнольдса определяют по следующим соотношениям:

$$Pr_{ж} = \frac{\nu_{ж}}{a_{ж}} \qquad Pr_{C} = \frac{\nu_{C}}{a_{C}} \tag{11.9}$$

$$Re_{xж} = \frac{W_0 \cdot x}{\nu_{ж}} \qquad Re_{lж} = \frac{W_0 \cdot l}{\nu_{ж}} \tag{11.10}$$

где: l – длина пластины, м;

W_0 – скорость потока, набегающего на пластину, м/с.

$\nu_{ж}$ и ν_C – кинематический коэффициент вязкости соответственно при температуре жидкости $t_{ж}$ и поверхности (стенки) t_C (см. приложение 7 и 8), м^2/с;

$a_{ж}$ и a_C – коэффициент температуропроводности жидкости соответственно при температуре жидкости $t_{ж}$ и поверхности (стенки) t_C (см. приложение 7 и 8), м^2/с

2) При ламинарном режиме течения для определения среднего по длине пластины коэффициента теплоотдачи α критерий Нуссельта находят по формуле:

$$Nu_{lж} = 0{,}66 \cdot Re_{lж}^{0,5} \cdot Pr_{ж}^{0,33} \cdot \left(\frac{Pr_{ж}}{Pr_C}\right)^{0,25} \tag{11.11}$$

3) При турбулентном режиме течения в пограничном слое $(Re > 4 \cdot 10^4)$ для определения местного коэффициента теплоотдачи α_X критерий Нуссельта находят по формуле:

$$Nu_{xж} = 0{,}03 \cdot Re_{xж}^{0,8} \cdot Pr_{ж}^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr_{ж}}{Pr_C}\right)^{0,25} \tag{11.12}$$

4) При турбулентном режиме течения для определения среднего по длине пластины коэффициента теплоотдачи α критерий Нуссельта находят по формуле:

$$Nu_{lж} = 0{,}037 \cdot Re_{lж}^{0,8} \cdot Pr_{ж}^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr_{ж}}{Pr_C}\right)^{0,25} \tag{11.13}$$

5) Для воздуха критерий Прандтля равен Pr = 0,71 и мало изменяется с изменением температуры. Поэтому в случае обтекания пластины воздухом или двухатомным газом

определение критерия Нуссельта для среднего коэффициента теплоотдачи α упрощается:

а) при ламинарном движении в пограничном слое ($Re < 4 \cdot 10^4$):

$$Nu_{l\text{ж}} = 0{,}57 \cdot Re_{l\text{ж}}^{0,5} \qquad (11.14)$$

б) при турбулентном режиме течения в пограничном слое ($Re > 4 \cdot 10^4$):

$$Nu_{l\text{ж}} = 0{,}032 \cdot Re_{l\text{ж}}^{0,8} \qquad (11.15)$$

Местный коэффициент теплоотдачи α_X определяется из соотношения:

$$Nu_{x\text{ж}} = \frac{\alpha_x \cdot x}{\lambda_{\text{ж}}} \qquad (11.16)$$

где $\lambda_{\text{ж}}$ – коэффициент теплопроводности жидкости (см. приложение 7), Вт/(м·К).

Средний по длине пластины коэффициент теплоотдачи α определяется из соотношения:

$$Nu_{l\text{ж}} = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda_{\text{ж}}} \qquad (11.17)$$

Теплоотдача при движении жидкости в трубах

Характер движения жидкости в трубах может быть ламинарным и турбулентным. О режиме течения судят по величине критерия Рейнольдса:

$$Re_{\text{ж}} = \frac{W \cdot d}{\nu_{\text{ж}}} \qquad (11.18)$$

где W – средняя скорость течения жидкости, м/с;

d – внутренний диаметр трубы, м;

$\nu_{\text{ж}}$ – кинематический коэффициент вязкости жидкости при заданной температуре среды $t_{\text{ж}}$, $м^2/с$ (см. приложение 7 и 8).

Если $Re < 2000$, то движение жидкости ламинарное. При $Re = 2 \cdot 10^3 \ldots 10^4$ режим течения называют переходным, а при Re

$> 10^4$ в трубе устанавливается развитое турбулентное движение жидкости.

Теория и опыты показывают, что теплоотдача при течении жидкости в трубе неодинакова по длине. У входа в трубу коэффициент теплоотдачи α имеет максимальное значение, а затем убывает на "участке тепловой стабилизации" длиной l_{CT}. За пределами этого участка ($l/d > 50$) коэффициент α не изменяется.

При *ламинарном* течении жидкости встречаются два режима неизотермического движения: *вязкостный* и *вязкостно-гравитационный*.

Вязкостный режим соответствует течению вязких жидкостей при отсутствии естественной конвекции. При этом режиме передача теплоты между стенками канала и жидкостью осуществляется только теплопроводностью.

Вязкостно-гравитационный режим имеет место тогда, когда вынужденное движение жидкости сопровождается естественной конвекцией. При этом режиме теплота передается не только теплопроводностью, но и конвекцией.

При вязкостном режиме для определения среднего коэффициента теплоотдачи α М.А. Михеев рекомендует критерий Нуссельта находить по формуле:

$$Nu_{жd} = 0{,}15 \cdot Re_{жd}^{0{,}33} \cdot Pr_{ж}^{0{,}43} \cdot \left(\frac{Pr_{ж}}{Pr_C} \right)^{0{,}25} \qquad (11.19)$$

При $Gr \cdot Pr > 8 \cdot 10^5$ имеет место вязкостно-гравитационный режим.

При этом параметры жидкости выбираются по условию

$t = 0{,}5 \cdot (t_0 + t_C)$, где t_0 – температура жидкости при входе в трубу.

При вязкостно-гравитационном режиме для приближенных расчетов среднего коэффициента теплоотдачи α критерий Нуссельта рекомендуется находить по формуле:

$$Nu_{жd} = 0{,}15 \cdot Re_{жd}^{0{,}33} \cdot Pr_{ж}^{0{,}43} \cdot Gr_{жd}^{0{,}1} \cdot \left(\frac{Pr_{ж}}{Pr_C} \right)^{0{,}25} \qquad (11.20)$$

где $Gr_{жd}$ – критерий Грасгофа:

$$Gr_{жd} = \frac{g \cdot d^3}{\nu_{ж}^2} \beta_{ж} \cdot \Delta t \qquad (11.21)$$

$\beta_{ж}$ – коэффициент объемного расширения жидкости при температуре жидкости $t_{ж}$ (см. приложение 7 и 8), 1/К.

Для воздуха это уравнение упрощается и имеет вид:

$$Nu_{жd} = 0{,}13 \cdot Re_{жd}^{0{,}33} \cdot Gr_{жd}^{0{,}1} \qquad (11.22)$$

Если трубы имеют длину $l < 50d$, то значение α, определенное по уравнениям (11.18), (11.19) и (11.20), надо умножить на поправочный коэффициент ε_l (см. табл. 11.1 при $Re = 2 \cdot 10^3$).

Таблица 11.1

Значение коэффициента ε_l при различных значениях $Re_{жd}$ в зависимости от l/d.

$Re_{жd}$	Отношение длины трубы к ее диаметру l/d								
	1	2	5	10	15	20	30	40	50
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$2 \cdot 10^3$	1,90	1,70	1,44	1,28	1,18	1,13	1,05	1,02	1
$1 \cdot 10^4$	1,65	1,50	1,34	1,23	1,17	1,13	1,07	1,03	1
$2 \cdot 10^4$	1,51	1,40	1,27	1,18	1,13	1,10	1,05	1,02	1
$5 \cdot 10^4$	1,34	1,27	1,18	1,13	1,10	1,08	1,04	1,02	1
$1 \cdot 10^5$	1,28	1,22	1,15	1,10	1,08	1,06	1,03	1,02	1
$1 \cdot 10^6$	1,14	1,11	1,08	1,05	1,04	1,03	1,02	1,01	1

При развитом *турбулентном* движении ($Re > 10^4$) для определения среднего коэффициента теплоотдачи α критерий Нуссельта рекомендуется находить по формуле:

$$Nu_{жсd} = 0{,}021 \cdot Re_{жсd}^{0,8} \cdot Pr_{ж}^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr_{ж}}{Pr_C} \right)^{0,25} \cdot \varepsilon_l \quad (11.23)$$

Для воздуха эта формула упрощается:

$$Nu_{жd} = 0{,}018 \cdot Re_{жd}^{0,8} \cdot \varepsilon_l \quad (11.24)$$

При *переходном* режиме критерий Нуссельта находят по формуле:

$$Nu = 0{,}008 \cdot Re_{ж}^{\ 0,9} \cdot Pr_{ж}^{\ 0,43} \quad (11.25)$$

В критериальных уравнениях (11.19) – (11.25) за определяющую температуру принята средняя температура потока, за определяющий размер – диаметр круглой трубы или эквивалентный диаметр трубы $d_{ЭКВ}$ любой формы сечения:

$$d_{ЭКВ} = \frac{4S_K}{U_K} \quad (11.26)$$

где S_K – площадь поперечного сечения канала, м^2;

U_K – полный периметр канала, м.

Критериальные уравнения (11.22) и (11.23) применимы в пределах:

$Re_{ж} = 1 \cdot 10^4 ... 5 \cdot 10^6$ и $Pr = 0{,}6 ... 2500$

Для труб, имеющих $l/d < 50$ коэффициент $\varepsilon_l > 1$ и выбирается по таблице 11.1. Если $l/d \geq 50$ то $\varepsilon_l = 1$.

Коэффициент теплоотдачи определяется из соотношения:

$$Nu_{l ж} = \frac{\alpha \cdot d}{\lambda_{Ж}} \quad (11.27)$$

При расчете изогнутых труб (змеевиков) коэффициент α, определенный для прямой трубы, умножают на поправочный коэффициент:

$$\varepsilon_{ЗМ} = 1 + 3{,}6 \cdot \frac{d}{D} \quad (11.28)$$

где d – диаметр трубы, м;

D – диаметр спирали, м.

11.4. Порядок выполнения работы

1) Получить у преподавателя исходные данные: условие протекания теплоотдачи (при обтекании плоской поверхности или при движении жидкости в трубах); тип движущегося теплоносителя; скорость движения жидкости; размеры плоской поверхности или трубы; температуры стенки t_C и теплоносителя (жидкости) $t_Ж$.

2) Определить характер движения среды, для этого нужно найти число Рейнольдса ($Re_ж$) по формуле (11.4) или (11.8).

а) для плоской пверхности:

– ламинарный режим: $Re < 4 \cdot 10^4$

– турбулентный режим: $Re > 4 \cdot 10^4$

б) для трубы:

– ламинарный режим: $Re < 2000$

– турбулентный режим: $Re > 10^4$

– переходный режим: $2000 \leq Re \leq 4 \cdot 10^4$

3) Определить критерии Прандтля ($Pr_Ж$) и (Pr_C) по формулам (11.9) и (11.10)

4) Определить критерий Грасгофа ($Gr_Ж$):

а) для плоской поверхности по формуле (11.6).

б) для трубы по формуле (11.21).

5) В зависимости от характера движения жидкости определить критерий Нуссельта (Nu):

а) для плоской поверхности:

– при ламинарном режиме по формуле (11.11);

– при турбулентном режиме по формуле (11.13);

б) для трубы:

– при ламинарном режиме предварительно необходимо найти произведение критериев Прандтля и Грагофа ($Gr_Ж \cdot Pr_Ж$) и затем производим расчет:

– при *ламинарном вязкостном* режиме ($Gr_ж \cdot Pr_ж < 8 \cdot 10^5$) по формуле (11.19);

– при *ламинарном вязкостно-гравитационном* режиме ($Gr_ж \cdot Pr_ж \geq 8 \cdot 10^5$) по формуле (11.20);

– при *турбулентном* режиме по формуле (11.23);

– при *переходном* режиме по формуле (11.25).

6) Определить коэффициент теплоотдачи:

а) для плоской поверхности по формуле (11.17).

б) для трубы по формуле (11.27).

7) Найти удельный тепловой поток по формуле (11.1).

11.5. Оформление отчета

Отчет по работе должен включать цель работы, задачи работы, результаты вычислений.

11.6. Контрольные вопросы

1. Что называют теплоотдачей?
2. Что такое конвективный теплообмен?
3. Как осуществляется перенос теплоты при ламинарном и турбулентном режимах течения?
4. Что представляет собой температурный напор?

Лабораторная работа № 12

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛООТДАЧИ ПРИ СВОБОДНОЙ КОНВЕКЦИИ ВОЗДУХА

12.1. Цель работы

Изучение методики экспериментального определения коэффициента теплоотдачи и обработки опытных данных.

12.2. Задачи работы

Определение коэффициента теплообмена при свободном обтекании трубы воздухом. Анализ опытных данных.

12.3. Теоретические положения

По определению, коэффициентом теплоотдачи α называется удельный тепловой поток, возникающий между поверхностью твердого тела и жидкой средой и отнесенный к разности температур стенки и жидкости в один градус [1]:

$$\alpha = \frac{q}{\Delta t}\ , \text{Вт/м}^2\cdot\text{К} \qquad (12.1)$$

где q – удельный тепловой поток, под которым понимается тепловой поток в единицу времени, приходящийся на единицу поверхности теплообмена:

$$q = \frac{\Phi}{S}\ , \text{Вт/м}^2 \qquad (12.2)$$

где Φ – тепловой лоток, передаваемый в единицу времени от поверхности трубы воздуху при конвективном теплообмене, Вт;

S – площадь поверхности теплообмена, м^2;

Δt – разность температур, под действием которой происходит теплообмен:

$$\Delta t = t_{ср} - t_0\ , {}^0\text{C} \qquad (12.3)$$

где $t_{ср}$ – средняя температура стенки трубы, ^{0}С

t_0 – температура окружающей среды, ^{0}С

С учетом выражения 12.2 коэффициент теплообмена можно определить по формуле:

$$\alpha = \frac{\Phi}{S \cdot \Delta t}\ , \text{Вт/м}^2\cdot\text{К} \qquad (12.4)$$

Между трубой и воздухом теплообмен происходит путем конвекции, теплопроводности (в воздухе) и излучения. Конвекция и теплопроводность в жидкой среде объединяются под названием конвективного теплообмена. Таким образом, общий тепловой поток складывается из конвективного и лучистого потоков:

$$Q = \Phi + Q_л. \qquad (12.5)$$

Аналогично и коэффициент теплоотдачи условно представляют как сумму конвективного и «лучистого» коэффициентов:

$$\alpha = \alpha_к + \alpha_л. \qquad (12.6)$$

Для определения коэффициента теплообмена, характеризующего конвективный теплообмен, следует из общего теплового потока исключить количество тепла, передаваемого лучистым путем:

Общий тепловой поток Φ от трубы к воздуху при установившемся режиме будет равен количеству подводимой в единицу времени электроэнергии, т. е. может быть найден по показаниям приборов:

$$\Phi = I \cdot U, \text{ Вт.} \qquad (12.7)$$

Где I – сила тока, А;

U – напряжение сети тока, В.

Поскольку коэффициент теплообмена зависит от большого числа факторов, для использования опытных данных на практике их следует обработать в критериальном виде. Конвективный теплообмен на границе со стенкой характеризуется

критерием подобия Нуссельта (Nu). Подобие процессов свободной конвекции определяется критерием Грасгофа (Gr). Физическое подобие описывается критерием Прандтля (Pr), но физические параметры воздуха пренебрежимо мало зависят от температуры, и поэтому критерий Прандтля является практически постоянной величиной.

Зная эти критерии можно определить коэффициент теплообмена по формуле [1]:

$$\alpha = Nu\frac{\lambda}{d} \qquad (12.8)$$

где d – диаметр трубы (определяющий размер), м;

λ – коэффициент теплопроводности теплоносителя, Вт/м·К (см. приложение 7).

12.3. Опытная установка

Опытная установка (Рис. 12.1) представляет собой горизонтальную медную трубу 1, внутри которой вмонтирован электрический нагреватель 2. На поверхности трубы запаяны шесть термопар 3, подключенных к электронному измерителю температуры 13 (потенциометру).

Торцы опытной трубы защищены тепловой изоляцией, а пространство между трубой и нагревателем заполнено песком. Все холодные спаи термопар помещены в сосуд 10, где находится масло с постоянной температурой.

При установившемся режиме весь тепловой поток от нагревателя передается через стенки трубы к окружающему воздуху. Вследствие нагревания трубы около ее поверхности возникает свободная конвекция. Мощность электронагревателя измеряется ваттметром или для определения мощности достаточно также измерять напряжение и силу тока в спирали.

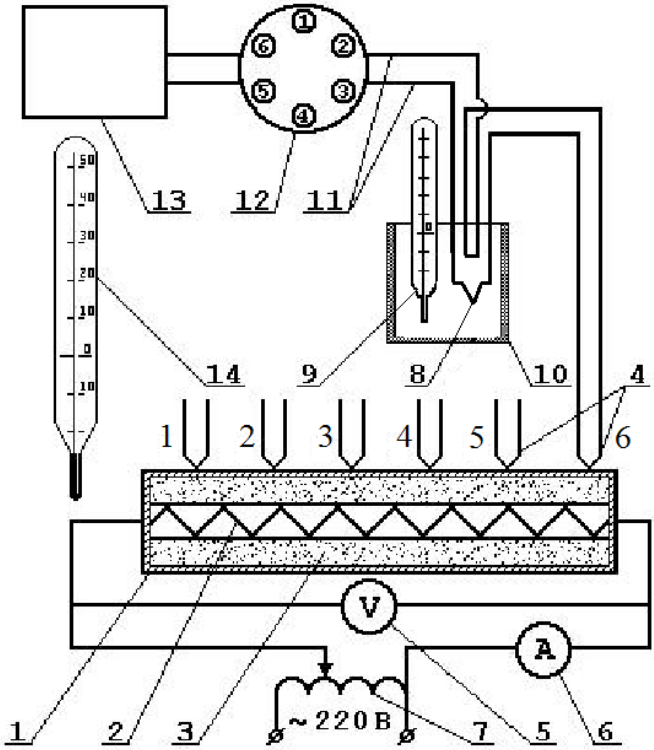

Рис. 12.1 Схема установки: 1 – горизонтальная труба; 2 – нагревательный элемент; 3 – заполнитель песок; 4 – горячие спаи термопар №1-6; 5 – вольтметр; 6 – амперметр; 7 – ЛАТР; 8 – холодные спаи термопар; 9 – термометр для замера температуры холодных спаев; 10 – сосуд Дьюара; 11 – компенсационные провода; 12 – переключатель термопар; 13 – электронный измеритель температуры; 14 – термометр для замера температуры окружающей среды

12.4. Проведение испытания

Перед проведением испытания следует ознакомиться с установкой и измерительными приборами и составить схему установки. После включения электрической спирали необходимо дождаться наступления установившегося (стационарного) режима, характеризующегося стабильностью показаний потенциометра во всех точках. После установления стационарного режима приступают к опыту. Во время опыта

записываются показания потенциометра последовательно для всех, термопар и показания ваттметра или заменяющих его амперметра 6 и вольтметра 5.

Отмечается также показание термометра 14, измеряющего температуру окружающего воздуха на достаточном удалении от трубы, и температура холодных спаев. В процессе испытания проводятся несколько опытов для разных режимов. Каждый режим характеризуется определенным значением напряжения, устанавливаемого посредством трансформатора и контролируемого вольтметром. В опыте делается несколько замеров через 4…5 минут. Результаты наблюдений заносятся в одну таблицу. Для каждого опыта результаты усредняются. По среднему показанию потенциометра в каждой точке установки термопары может быть определена средняя температура стенки трубы:

$$t_{CP} = \frac{\sum t_{Ti}}{6} \ , {}^0\text{C} \qquad (12.12)$$

где t_{Ti} – показания термопар по милливольтметру.

Если холодные спаи не погружены в тающий лед, а находятся на воздухе, показания потенциометра соответствуют разности температур стенки и помещения. Поэтому по показаниям измерителя 13 удобно определять разность температур и затем найти температуру стенки трубы. Если зависимость между температурами и соответствующими ТЭДС линейна, допустимо среднюю температуру стенки трубы определяют по среднему значению ТЭДС для трубы.

12.5. Обработка опытных данных

1) Находим общий тепловой поток Ф от трубы к воздуху по формуле 12.7.

2) Определяем среднюю температуру стенки трубы $t_{ср}$ по формуле 12.12

3) По формуле 12.3. определяем разность температур Δt, под действием которой происходит теплообмен

4) Определяем коэффициент теплообмена α по формуле 12.4. Площадь поверхности теплообмена F берем из паспорта установки.

12.8. Оформление отчета

Отчет по работе должен включать цель работы, задачи работы, схему установки. Данные замеров и расчеты свести в таблицу 12.1.

Таблица 12.1

Таблица опытных данных

№ замера	Напряжение, В	Сила тока, А	Показания потенциометра						Температура окружающей среды t_0	Температура стенки t_{CP}	Разность температур Δt
			1	2	3	4	5	6			

12.9. Контрольные вопросы

1. Какой физический смысл коэффициента теплоотдачи?
2. Какие виды теплообмена включает процесс теплоотдачи?
3. Почему для измерения температуры поверхности трубы используется не одна, а шесть термопар?
4. Как определяется тепловой поток, передаваемый от трубы воздуху?

Лабораторная работа №13

ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ТЕПЛООБМЕНА

13.1. Цель работы

Изучение процесса теплопередачи и характеризующих его величин. Ознакомление с законами распространения теплоты посредством теплопередачи и методами определения основных параметров при переносе теплоты через различные типы поверхностей.

13.2. Задачи работы

Научиться производить расчеты параметров при переносе теплоты через плоские и цилиндрические стенки в процессе теплопередачи.

13.3. Теоретические положения

Рассматриваемые выше процессы теплообмена: теплопроводность, конвекция и тепловое излучение на практике редко встречаются обособленно. Конвекция, например, часто сопровождается тепловым излучением, теплопроводность в пористых телах – конвекцией и излучением в порах, а тепловое излучение – теплопроводностью и конвекцией [3].

Процесс переноса тепла между потоком и стенкой также является результатом совокупного действия конвективного теплообмена и теплового излучения, это так называемый *сложный теплообмен.* Лучистый теплообмен учитывают обычно при достаточно высоких температурах теплоносителя $t_{ж}$ или теплоотдающей поверхности $t_{С}$. При сложном теплообмене количественной характеристикой процесса является *суммарный* коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha_0 = \alpha_К + \alpha_Л \qquad (13.1)$$

где $\alpha_К$ – коэффициент теплоотдачи *конвекцией;*

$\alpha_Л$ – коэффициент теплоотдачи *излучением.*

Удельные тепловые потоки конвекции $q_К$ и лучистого теплообмена $q_Л$, соответственно равны:

$$q_К = \alpha_К \cdot (t_С - t_Ж) \cdot A, \text{ Вт/м}^2 \qquad (13.2)$$

$$q_Л = \varepsilon \cdot C_0 \cdot \left[\left(\frac{T_Ж}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_С}{100} \right)^4 \right], \text{ Вт/м}^2 \qquad (13.3)$$

где ε – приведенная степень черноты системы;

C_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела, равный 5,67 Вт/(м^2·К^4);

$T_Ж$, $T_С$ – соответственно абсолютная температура жидкости и поверхности, К.

Суммируя эти уравнения, получим:

$$q_0 = q_К + q_Л = \alpha_К \cdot (t_Ж - t_С) + \varepsilon \cdot C_0 \cdot \left[\left(\frac{T_Ж}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_С}{100} \right)^4 \right] \qquad (13.4)$$

При рассмотрении процесса переноса теплоты от нагретого теплоносителя к холодному через твердую стенку задача еще более усложняется. Этот сложный процесс называется *теплопередачей*.

Количественной характеристикой процесса *теплопередачи* является *коэффициент теплопередачи К,* значение которого определяет тепловой поток от одной жидкости к другой через единицу поверхности при разности температур между жидкостями а один градус ^{0}С или *К.* При этом *уравнение теплопередачи* имеет вид:

$$Ф = K \cdot F \cdot (t_{Ж1} - t_{Ж2}), \text{ Вт} \qquad (13.5)$$

где *Ф* – тепловой поток, Вт*;*

К – коэффициент теплопередачи, *Вт /(м^2·К);*

$t_{Ж1}$ *и* $t_{Ж2}$ – температуры жидкостей, ^{0}С;

F – поверхность теплообмена, *м^2* .

Если *площадь поверхности* равна 1 $м^2$ или соответствует участку трубы длиной 1 м по оси, то получаем *удельный* тепловой поток q ($Вт/м^2$) или *линейный* тепловой поток q_L (Вт/м).

Физическая сторона сложною процесса теплопередачи всецело определяется явлениями теплопроводности, конвекции и теплового излучения, а коэффициент теплопередачи является количественной, чисто расчетной характеристикой процесса. Связь между коэффициентом теплопередачи, с одной стороны, и коэффициентами теплопроводности и теплоотдачи – с другой, зависит от формы стенки, отделяющей горячую жидкость от холодной.

Теплопередача через однослойную плоскую стенку при стационарном режиме

Имеется однослойная плоская стенка с коэффициентом теплопроводности λ и толщиной δ (рис. 13.1). По одну сторону стенки находится горячая среда с температурой $t_{Ж1}$, по другую – холодная с температурой $t_{Ж2}$.

Температуры поверхностей неизвестны, обозначим их t_{C1} и t_{C2}. Значение суммарного коэффициента теплоотдачи на горячей стороне равно α_1, а на холодной – α_2.

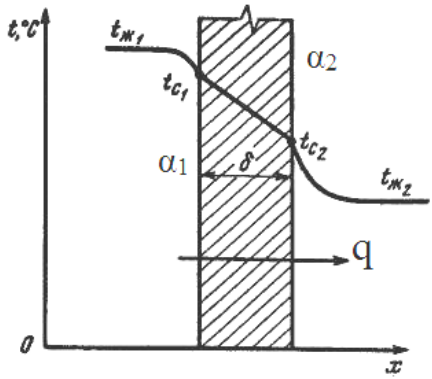

Рис. 13.1. Теплопередача через плоскую однослойную стенку

Поскольку режим стационарный, удельный тепловой поток q есть величина постоянная во времени и не зависит от координаты x (рис. 4.1). Поэтому можно записать следующие три выражения для удельного теплового потока:

$$\begin{cases} q = \alpha_1 (t_{Ж1} - t_{C1}) \\ q = \dfrac{\lambda}{\delta}(t_{C1} - t_{C2}) \\ q = \alpha_2 (t_{C2} - t_{Ж2}) \end{cases} \qquad (13.6)$$

Из этих выражений выносим температурные напоры:

$$\begin{cases} \dfrac{q}{\alpha_1} = t_{Ж1} - t_{C1} \\ \dfrac{q \cdot \delta}{\lambda} = t_{C1} - t_{C2} \\ \dfrac{q}{\alpha_2} = t_{C2} - t_{Ж2} \end{cases} \qquad (13.7)$$

Складываем правые и левые части уравнений (13.7) получим:

$$q \cdot \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} \right) = t_{Ж1} - t_{Ж2} \qquad (13.8)$$

Отсюда значение удельного теплового потока равно:

$$q = \frac{1}{\left(\dfrac{1}{\alpha_1} + \dfrac{\delta}{\lambda} + \dfrac{1}{\alpha_2} \right)} \cdot \left(t_{Ж1} - t_{Ж2} \right) = K \cdot \left(t_{Ж1} - t_{Ж2} \right) \qquad (13.9)$$

Коэффициент теплопередачи определяется по формуле:

$$K = \frac{1}{\dfrac{1}{\alpha_1} + \dfrac{\delta}{\lambda} + \dfrac{1}{\alpha_2}}, \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К} \qquad (13.10)$$

Величина, обратная коэффициенту теплопередачи, называется *полным термическим сопротивлением процесса теплопередачи:*

$$R = \frac{1}{K} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}, \text{ м}^2\cdot\text{К/Вт} \qquad (13.11)$$

Из этого соотношения следует, что полное (общее) термическое сопротивление равно сумме частных сопротивлений:

$$R = R_{\alpha_1} + R_{\lambda} + R_{\alpha_2} \qquad (13.12)$$

$$R_{\lambda} = \frac{\delta}{\lambda} \qquad R_{\alpha_1} = \frac{1}{\alpha_1} \qquad R_{\alpha_2} = \frac{1}{\alpha_2} \qquad (13.13)$$

Используя соответствующее уравнение системы (13.7) можно определить температуры поверхностей t_{C1} и t_{C2}:

$$t_{C1} = t_{Ж1} - \frac{q}{\alpha_1} \qquad (13.14)$$

$$t_{C2} = t_{Ж2} + \frac{q}{\alpha_2} \qquad (13.15)$$

Теплопередача через многослойную плоскую стенку при стационарном режиме

Рассмотрим плоскую стенку, состоящую из двух слоев (рис. 13.2). Толщины слоев δ_1 и δ_2. Коэффициенты теплопроводности слоев λ_1 и λ_2. Контакт между слоями – идеальный. Суммарные коэффициенты теплоотдачи равны: на горячей стороне – α_1, на холодной – α_2.

В остальном этот случай не отличается от предыдущего (рис. 13.1). Поэтому можно использовать результаты вывода, сделанного для случая однослойной плоской стенки, т.е. выражения (13.9), (13.10) и (13.11).

Для случая многослойной стенки с числом слоев «*n*» уравнение удельного теплового потока имеет вид:

$$q = \frac{1}{\left(\frac{1}{\alpha_1} + \sum_1^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}\right)} \cdot \left(t_{Ж1} - t_{Ж2}\right) = K \cdot \left(t_{Ж1} - t_{Ж2}\right) \qquad (13.16)$$

где δ_i и λ_i – это соответственно толщина и коэффициент теплопроводности i-го слоя.

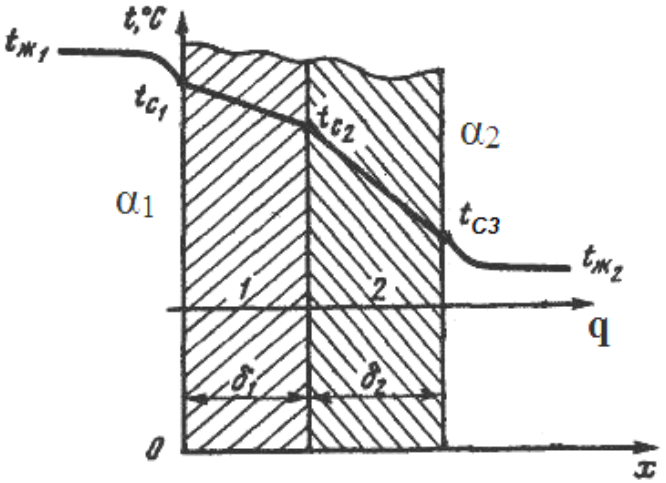

Рис. 13.2. Теплопередача через плоскую двухслойную стенку

Для двухслойной плоской стенки получим:

$$q = \frac{1}{\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_2}\right)} \cdot \left(t_{Ж1} - t_{Ж2}\right) \qquad (13.17)$$

Коэффициент теплопередачи определяется по формуле:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_2}}, \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К} \qquad (13.18)$$

Полное термическое сопротивление двухслойной плоской равно:

$$R = \frac{1}{K} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_2}, \text{ м}^2\cdot\text{К/Вт} \qquad (13.19)$$

Для определения температуры наружных поверхностей слоев 1 и 2 можно использовать уравнения (13.14) и (13.15).

$$t_{C1} = t_{Ж1} - \frac{q}{\alpha_1} \qquad (13.20)$$

$$t_{C3} = t_{Ж2} + \frac{q}{\alpha_2} \tag{13.21}$$

Температуры между слоями можно найти по формулам, используя уравнения теплопроводности для первого и второго слоёв:

$$\begin{cases} q = \dfrac{\lambda_1}{\delta_1}(t_{C1} - t_{C2}) \\ q = \dfrac{\lambda_2}{\delta_2}(t_{C2} - t_{C3}) \end{cases} \tag{13.22}$$

Отсюда получим:

$$t_{C2} = t_{C1} - \frac{q \cdot \delta_1}{\lambda_1} \tag{13.23}$$

$$t_{C2} = t_{C3} + \frac{q \cdot \delta_2}{\lambda_2} \tag{13.24}$$

Теплопередача через однослойную цилиндрическую стенку

Пусть имеется цилиндрическая трубчатая поверхность с внутренним диаметром d_1, внешним диаметром d_2 и длиной L (Рис. 13.3). Стенка трубы однородна, её коэффициент теплопроводности λ.

Внутри трубы протекает горячая среда с температурой $t_{Ж1}$, а снаружи – холодная с температурой $t_{Ж2}$. Температуры поверхностей стенки обозначим их t_{C1} и t_{C2}. Со стороны горячей среды суммарный коэффициент теплоотдачи равен α_1, а со стороны холодной – α_2.

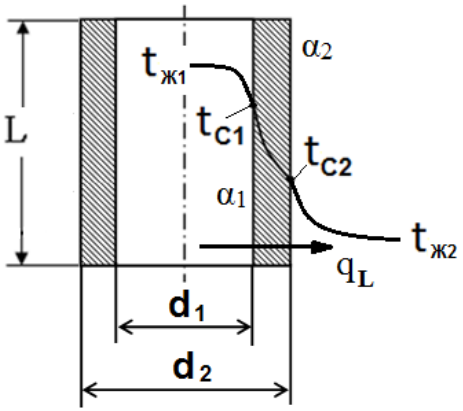

Рис. 13.3. Теплопередача через однослойную цилиндрическую стенку

Тепловой режим стационарный, поэтому линейный тепловой поток q_L величина постоянная и можно записать следующую систему уравнений для удельного теплового потока:

$$\begin{cases} q_L = \alpha_1 \cdot \pi \cdot d_1 \,(t_{Ж1} - t_{C1}) \\ q_L = \dfrac{2\pi \cdot \lambda}{ln\dfrac{d_2}{d_1}} (t_{C1} - t_{C2}) \\ q_L = \alpha_2 \cdot \pi \cdot d_2 \,(t_{C2} - t_{Ж2}) \end{cases} \qquad (13.25)$$

Из этих уравнений вынесем температурные напоры:

$$\begin{cases} \dfrac{q_L}{\alpha_1 \cdot \pi \cdot d_1} = t_{Ж1} - t_{C1} \\ \dfrac{q_L}{2\pi \cdot \lambda} ln\dfrac{d_2}{d_1} = t_{C1} - t_{C2} \\ \dfrac{q_L}{\alpha_2 \cdot \pi \cdot d_2} = t_{C2} - t_{Ж2} \end{cases} \qquad (13.26)$$

Сложим, левые и правые части полученных выражений:

$$\frac{q_L}{\pi}\left(\frac{1}{\alpha_1 \cdot d_1}+\frac{1}{2\lambda} ln\frac{d_2}{d_1}+\frac{1}{\alpha_2 \cdot d_2}\right)=t_{Ж1}-t_{Ж2} \quad (13.27)$$

Отсюда получим уравнение для *линейного* удельного теплового потока:

$$q_L=\frac{\pi\left(t_{Ж1}-t_{Ж2}\right)}{\frac{1}{\alpha_1 \cdot d_1}+\frac{1}{2\lambda} ln\frac{d_2}{d_1}+\frac{1}{\alpha_2 \cdot d_2}}=K_L \cdot \pi\left(t_{Ж1}-t_{Ж2}\right) \quad (13.28)$$

где K_L – линейный коэффициент теплопередачи, Вт /(м К).

$$K_L=\frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 \cdot d_1}+\frac{1}{2\lambda} ln\frac{d_2}{d_1}+\frac{1}{\alpha_2 \cdot d_2}}, \text{ Вт /(м·К)} \quad (13.29)$$

Линейное термическое сопротивление теплопередачи находится по формуле:

$$R_L=\frac{1}{K_L}=\frac{1}{\alpha_1 \cdot d_1}+\frac{1}{2\lambda} ln\frac{d_2}{d_1}+\frac{1}{\alpha_2 \cdot d_2}, \text{ м·К/Вт} \quad (13.30)$$

Значения температур поверхностей стенки t_{C1} и t_{C2} определяются из формул системы (13.26):

$$t_{C1}=t_{Ж1}-\frac{q_L}{\alpha_1 \cdot \pi \cdot d_1} \quad (13.31)$$

$$t_{C2}=t_{Ж2}+\frac{q_L}{\alpha_2 \cdot \pi \cdot d_2} \quad (13.32)$$

Теплопередача через многослойную цилиндрическую стенку

Рассмотрим передачу теплоты через двухслойную цилиндрическую стенку (рис. 13.4). Диаметры стенок d_1, d_2, d_3. Коэффициенты теплопроводности отдельных слоев λ_1 и λ_2. Температура горячей среды $t_{Ж1}$, холодной среды – $t_{Ж2}$. Коэффициент теплоотдачи со стороны горячей среды α_1, со стороны холодной – α_2.Температуры поверхностей стенки – t_{C1}, t_{C2}, t_{C3}. Контакт между слоями идеальный.

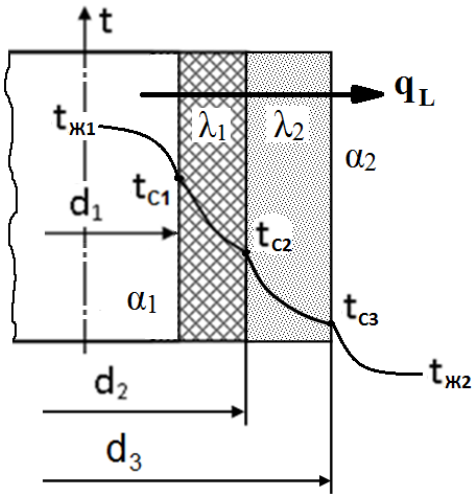

Рис. 13.4. Теплопередача через двухслойную цилиндрическую стенку

При установившемся тепловом режиме можно составить систему уравнений для удельного теплового потока:

$$\begin{cases} q_L = \alpha_1 \cdot \pi \cdot d_1 \,(t_{Ж1} - t_{C1}) \\ q_L = \dfrac{2\pi \cdot \lambda_1}{ln(d_2 / d_1)} (t_{C1} - t_{C2}) \\ q_L = \dfrac{2\pi \cdot \lambda_2}{ln(d_3 / d_2)} (t_{C2} - t_{C3}) \\ q_L = \alpha_2 \cdot \pi \cdot d_3 \,(t_{C3} - t_{Ж2}) \end{cases} \qquad (13.33)$$

Решая эту систему уравнений, получим уравнение для *линейного* удельного теплового потока через двухслойную стенку:

$$q_L = \frac{\pi\left(t_{Ж1} - t_{Ж2}\right)}{\dfrac{1}{\alpha_1 \cdot d_1} + \dfrac{1}{2\lambda_1} ln\dfrac{d_2}{d_1} + \dfrac{1}{2\lambda_1} ln\dfrac{d_3}{d_2} + \dfrac{1}{\alpha_2 \cdot d_3}} \qquad (13.34)$$

Уравнение для линейного коэффициента теплопередачи примет вид:

$$K_L = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 \cdot d_1} + \frac{1}{2\lambda_1} ln\frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{2\lambda_1} ln\frac{d_3}{d_2} + \frac{1}{\alpha_2 \cdot d_3}}, \text{ Вт /(м·К)} \quad (13.35)$$

Линейное термическое сопротивление теплопередачи находится по формуле:

$$R_L = \frac{1}{K_L} = \frac{1}{\alpha_1 \cdot d_1} + \frac{1}{2\lambda_1} ln\frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{2\lambda_1} ln\frac{d_3}{d_2} + \frac{1}{\alpha_2 \cdot d_3}, \text{ м·К/Вт} \quad (13.36)$$

Температуры t_{C1}, t_{C2}, t_{C3} находят, используя соответствующее уравнение системы (13.33).

Для определения температуры наружных поверхностей слоев 1 и 2 можно использовать уравнения (13.31) и (13.32):

$$t_{C1} = t_{Ж1} - \frac{q_L}{\alpha_1 \cdot \pi \cdot d_1} \quad (13.37)$$

$$t_{C3} = t_{Ж2} + \frac{q_L}{\alpha_2 \cdot \pi \cdot d_3} \quad (13.38)$$

Температуры между слоями можно найти из формул системы уравнений (13.33), используя уравнения теплопроводности для первого и второго слоёв:

$$t_{C2} = t_{C1} - \frac{q_L \cdot ln(d_2 / d_1)}{2\pi \cdot \lambda_1} \quad (13.39)$$

$$t_{C2} = t_{C3} + \frac{q_L \cdot ln(d_3 / d_2)}{2\pi \cdot \lambda_2} \quad (13.40)$$

13.4. Порядок выполнения работы

1) Получить у преподавателя исходные данные: тип и размеры стенки (для плоской – ширину, высоту и толщину; для цилиндрической – диаметры); материал слоев стенки; температуры теплоносителей $t_{Ж1}$ и $t_{Ж2}$; коэффициенты теплоотдачи α_1 и α_2.

2) Для заданных материалов слоев стенки определить коэффициенты теплопроводности слоев λ_1 и λ_2, используя приложения 4, 5 и 6.

3) Определить коэффициенты теплопередачи:

а) для двухслойной плоской стенки по формуле (13.17).

б) для двухслойной цилиндрической стенки по формуле (13.32).

4) Определить термическое сопротивление теплопередачи:

а) для двухслойной плоской стенки по формуле (13.18)

б) для двухслойной цилиндрической стенки по формуле (13.33)

5) Найти удельный тепловой поток поформуле:

$$q = K \cdot (t_{ж1} - t_{ж2}), \text{ Вт/м}^2 \qquad (13.34)$$

Для цилиндрической стенки в уравнении (13.34) удельный тепловой поток и коэффициент теплопередачи записываем с индексом «L»: q_L и K_L

6) Найти температуру наружных поверхностей стенки t_{C1} и t_{C3}:

а) для двухслойной плоской стенки по формулам (13.20) и (13.21).

б) для двухслойной цилиндрической стеники по формулам (13.37) и (13.38).

7) Найти температуру поверхности между слоями t_{C2}:

а) для двухслойной плоской стенки по формулам (13.23) или 13.24.

б) для двухслойной цилиндрической стенки по формулам (13.39) или (13.40).

13.5. Оформление отчета

Отчет по работе должен включать цель работы, задачи работы, результаты вычислений и поясняющие рисунки.

13.6. Контрольные вопросы

1. Какие способы переноса теплоты включает сложный теплообмен?

2. Из чего состоит процесс теплопередачи?

3. Из чего складывается полное термическое сопротивление при передаче теплоты через однослойную плоскую стенку?

4. Какие составляющие включает в себя уравнение удельного теплового потока для случая передачи теплоты через плоскую многослойную стенку?

Лабораторная работа № 14

ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ ИСПАРИТЕЛЬНОГО ЦИРКУЛЯЦИОННОГО КОНТУРА

14.1. Цель работы

Изучение процессов, происходящих в паровом котле.

14.2. Задачи работы

Определение кратности циркуляции в контуре. Определение движущего напора циркуляционного контура. Работа с таблицами и диаграммами водяного пара.

14.3. Теоретические сведения

Водяной пар широко применяется на тепловых и атомных электростанциях в качестве рабочего тела для паротурбинных установок. Кроме того, вода и водяной пар являются самыми распространенными теплоносителями в теплообменных аппаратах, в энергетических и технологических системах, а также в системах теплоснабжения и отопления.

Для анализа процессов изменения состояния воды и водяного пара обычно используют диаграммы p-v (рис. 14.1) и T-s (рис. 14.2), а для расчета процессов – диаграмму h-s и

таблицы термодинамических свойств воды и водяного пара (Приложение 10) [2].

Водяной пар для промышленных целей получают в парогенераторах (паровых котлах) различного типа, общим для которых является то, что процесс получения пара является изобарным. Температура кипения воды и образующегося из нее пара является при этом постоянной, она зависит только от давления парогенератора и называется температурой насыщения $T_Н$.

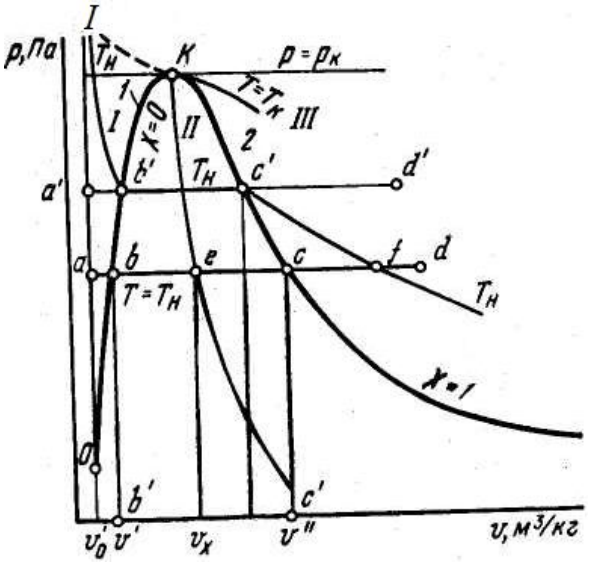

Рис. 14.1. P-v-диаграмма водяного пара

Пар, температура которого равна температуре насыщения, называется насыщенным (пар находится в термодинамическом равновесии с кипящей жидкостью). Насыщенный пар, не содержащий примеси жидкости, называют сухим насыщенным паром. Смесь сухого насыщенного пара и кипящей жидкости называется влажным насыщенным паром. Массовая доля сухого насыщенного пара в этой смеси называется степенью сухости и обозначается x. Для сухого насыщенного пара x=1, для кипящей жидкости x = 0, для влажного насыщенного пара 0<x<1.

В этих таблицах параметры кипящей жидкости – удельный объем, энтальпия, энтропия – обозначены, соответственно, υ', h', s', а параметры сухого насыщенного пара – v'', h'', s''. Параметры влажного насыщенного пара обычно обозначают v_x, h_x и s_x и определяют по следующим формулам как для смеси кипящей воды и сухого пара:

$$v_x = v''\cdot x + v'(1-x),\ м^3/кг \qquad (14.1)$$

$$h_x = h''\ x + h'(1-x),\ кДж/кг \qquad (14.2)$$

$$s_x = s''\cdot x + s'(1-x),\ кДж/кг\cdot К \qquad (14.3)$$

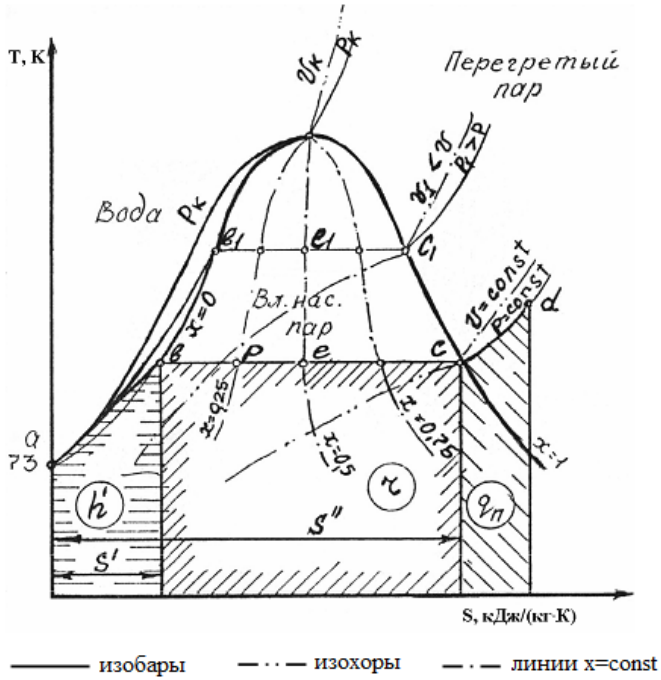

Рис. 14.2. T-s-диаграмма водяного пара

Параметры перегретого пара обозначают без каких-либо штрихов и индексов, т. е. v, h и s.

Поскольку водяной пар получают в изобарном процессе, то количество теплоты, подводимой к рабочему телу, можно подсчитать как разность энтальпий в конце и начале процесса. Это очень удобно, т.к. позволяет обойтись без теплоемкости,

которая в данном случае (реальный газ) зависит не только от температуры, но и от давления.

Под теплотой парообразования *r* понимают количество теплоты, необходимое для превращения 1 кг кипящей жидкости при постоянном давлении (следовательно, и при постоянной температуре) в сухой насыщенный пар.

Теплота парообразования, учитывая сказанное, равна:

$$r = h'' - h' \qquad (14.4)$$

Внутренняя энергия пара находится через его энтальпию из выражения:

$$u = h - p \cdot v \qquad (14.5)$$

На диаграммах p-v, T-s и h-s водяного пара показывают нижнюю пограничную кривую (x=0) или линию кипящей жидкости и верхнюю пограничную кривую (x=1) или линию сухого насыщенного пара. Пограничные линии делят диаграммы на области капельной жидкости (воды), влажного насыщенного пара и перегретого пара.

Пограничные кривые соединяются в критической точке К, обозначающей критическое состояние воды, когда нет различия между кипящей жидкостью и сухим паром. Параметры критического состояния:

P_K = 221,5 бар; t_K = 374,12 ^{0}C; v_K = 0,003147 м^3/кг;

s_K = 4,4237 кДж/кг·К; h_K = 2095, 2 кДж/кг.

Существует также понятие тройной точки состояния воды, которая соответствует случаю, когда одновременно в равновесном состоянии находятся пар, жидкость и лед:

p_0 = 611 Па; T_0 = 273,16 К; v_0 = 0,001 м^3/кг;

s_0 = 0; h_0 = 0.

14.4. Описание опытной установки и внутрикотловых процессов.

Опытная установка представляет собой простейшую стеклянную модель однобарабанного котла (Рис. 14.1). Левая

подъемная труба 2 имеет электрообогрев 1 , мощность которого регулируется посредством реостата. Водяной пар из барабана 3 котла отводится в пароводяной теплообменник 5 и в нем конденсируется. Конденсат стекает в подставленную емкость 6. Мощность электрического тока, подводимого к спирали, фиксируется ваттметром.

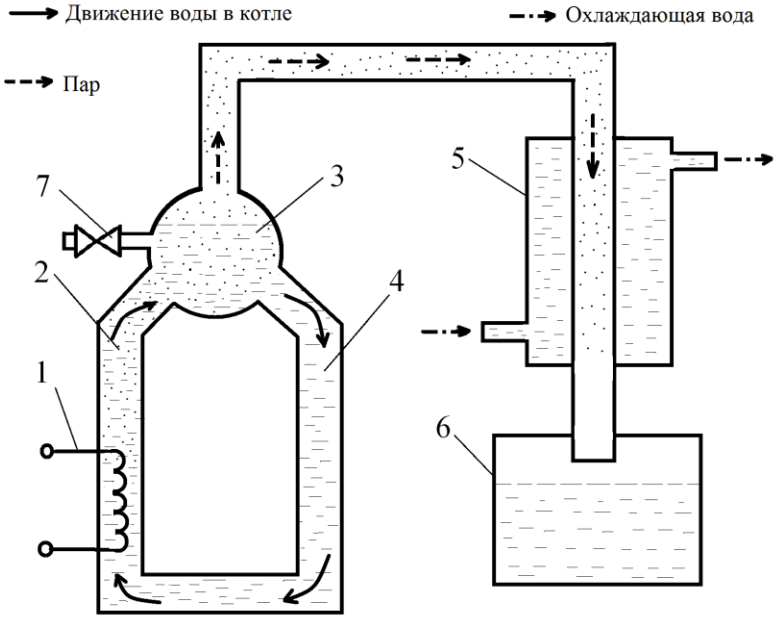

Рис. 14.3. Схема установки: 1 – электронагреватель, 2 – подъемная труба, 3 – пароводяной барабан, 4 – опускная труба, 5 – конденсатор, 6 – емкость для конденсата, 7 – вентиль подвода питательной воды

В действительных котлах обычно осуществляется естественная циркуляция – движение рабочей среды, по замкнутому контуру, состоящему из обогреваемых и необогреваемых труб и коллекторов. Это движение возникает вследствие разности плотностей пароводяной смеси в подъемной ветви контура и воды в опускной. При естественной циркуляции количество жидкости, проходящей через экранные трубы в единицу времени, многократно превышает количество образующегося в них пара, что обеспечивает интенсивное охлаждение стенок труб и поддержание их при температуре, близкой к температуре

кипящей воды. Режим циркуляции характеризуется рядом величин. Это скорость циркуляции, подсчитываемая обычно как скорость воды на входе в подъемную трубу и кратность циркуляции К.

Кратностью циркуляции называют отношение количества воды и пара $m_{ВП}$, проходящих через любое сечение данного контура в единицу времени, к количеству выделившегося в контуре пара $m_{П}$ за то же время:

$$K = \frac{m_{ВП}}{m_{П}} \qquad (14.6)$$

Обычно скорость циркуляции находится в пределах 0,5...1,5 м/с. В контурах, включающих экраны, кратность циркуляции составляет от 4 до 20; в контурах, состоящих из барабанов, соединенных пучками кипятильных труб от 10 до 100.

14.6. Проведение работы

Студенты приступают к работе после ознакомления с устройством установки. Пуск установки производится в следующем порядке:

1) открытие вентиля на трубопроводе охлаждающей воды через конденсатор;

2) проверка уровня воды в барабане и включение нагревательной спирали;

3) при закипании воды в подъемной трубе с помощью реостата добиваются равномерного кипения воды, которое должно начинаться несколько ниже середины по высоте трубки.

4) дожидаются установившегося режима, о чем свидетельствует равномерное поступление капель конденсата из конденсатора через равные промежутки времени

5) сливают конденсат из измерительной емкости и, засекая время, начинают наблюдение.

6) в течение всего опыта с интервалом в 2 мин. записывают показания барометра.

7) по окончании опыта определяют массу конденсата $m_{Конд}$ в измерительной емкости.

14.7. Обработка результатов

1) Определить кратность циркуляции пароводяного контура, т. е. отношение расхода воды $m_{Вод}$, проходящей через контур, к его паропроизводительности $m_П$:

$$K = \frac{m_{ВОД}}{m_П} \qquad (14.7)$$

где $m_{Вод}$ – расход воды, кг/с;

$m_П$ – паропроизводительность, кг/с:

$$m_П = \frac{m_{КОНД}}{\tau} \qquad (14.8)$$

где $m_{Конд}$ – масса конденсата, кг;

τ – время замера, с.

2) Вычислить степень сухости пара:

$$X = \frac{1}{K} \qquad (14.9)$$

3) Определить полный движущийся напор циркуляционного контура $P_{ДВ}$:

$$P_{ДВ} = 9{,}8(\rho' - \rho_X)(H - H_{Г.З.}) \text{ Н/м}^2 \qquad (14.10)$$

где $\rho^{/}$ – плотность воды, принимают $\rho^{/} = 1000$ кг/м^3;

ρ_X – плотность пароводяной смеси, кг/м^3.

$$\rho_X = \frac{1}{v_X} = \frac{1}{v_X^{//} + v^{/}(1 - X)} \text{ кг/м}^3 \qquad (14.11)$$

где $H_{ТЗ}$ – высота, на которой начинается кипение воды в подъемной трубе, м;

H – высота верха подъемной трубы, м;

$v^{/}$ – удельный объем насыщенной воды, м^3/кг (см. Приложение 10);

$v^{//}$ – удельный объем насыщенного пара, м^3/кг (см. Приложение 10).

4) По таблицам водяного пара (Приложение 10) определить температуру пара Т в контуре, энтальпии кипящей

жидкости h' и пара h'', энтропии кипящей жидкости s' и пара s'' при данном атмосферном давлении.

5) Определяем теплоту испарения r по формуле 14.4.

14.8. Оформление отчёта

Отчет должен включать схему установки, данные измерений, расчеты и рисунки графиков процессов парообразования.

Таблица 14.1

Измеряемые и расчетные данные

Параметр	Обозначение	№ опыта		
		1	2	3
Масса конденсата, кг	$m_{КОНД}$			
Расход воды, кг/с	$m_{ВОД}$			
Паропроизводительность, кг/с	$m_{П}$			
Кратность циркуляции	К			
Время замера, с	τ			
Температура пара, К	Т			
Полный движущийся напор циркуляционного контура, Н/м^2	$P_{ДВ}$			
Энтальпия кипящей жидкости, кДж/кг	h'			
Энтальпия пара, кДж/кг	h''			
Энтропия кипящей жидкости, кДж/кг·К	s'			
Энтропия пара, кДж/ кг·К	s''			
Теплота испарения, кДж/кг	r			

14.9. Контрольные вопросы

1. Что такое влажный насыщенный, сухой насыщенный и перегретый пар.
2. Что такое кратность циркуляции пароводяного контура.
3. Проанализировать процессы парообразования на p-v-диаграмме водяного пара

ЛИТЕРАТУРА

1. Драганов Б.Х., Кузнецов А.В., Рудобашта С.П. Теплотехника и применение теплоты в сельском хозяйстве. – М.: Агропромиздат, 1990. – 463 с.
2. Жуховицкий Д.Л., Сборник задач по технической термодинамике: Учебное пособие. – 2-е изд. – Ульяновск: УлГТУ, 2002. – 83 с.
3. Жуховицкий Д.Л., Сборник задач по теплопередаче: учебное пособие. – 2-е изд. – Ульяновск: УлГТУ, 2004. – 98 с.
4. Кривоносов А.И., Новиков П.Н., Кауфман В.Я. Задачник по контрольно-измерительным приборам и автоматике. – М.: Агропромиздат, 1990. – 160 с.
5. Луканин В.Н., Шатров М.Г. Теплотехника: учебник для вузов – 2-е изд. перераб. – М: Высшая школа, 2000
6. Нащокин В.В. Техническая термодинамика и теплопередача – М.: Высшая школа, 1975. – 496 с.
6. Теплотехника: Методические указания к лабораторному практикуму. – Владивосток: ДВГТУ. – 64 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

Характеристика наиболее распространенных термопар

Наименование термопары	Тип термопары	Обозначение градуировки	Верхний рабочий предел в °С при нагреве	
			Длительном	Кратковременном
Платинородий-платиновая	ТП	ПП	1300	1600
Хромель-алюминиевая	ТХ	ХА	900	1300
Хромель-копелевая	ТХК	ХК	600	800
Железо-копелевая		ЖК	600	800
Медь-копелевая		МК	350	600
Железо-константановая		Ж	600	800
Медь-константановая		М	360	600

Приложение 2

Молекулярные массы и газовые постоянные важнейших газов

Наименование	Плотность $\rho_Г$, кг/м^3	Молекулярная масса $\mu_Г$, кг/кмоль	Газовая постоянная $R_Г$, Дж/(кг·К)
Воздух	1,293	28,96	287,0
Кислород (O_2)	1,429	32,00	259,8
Азот (N_2)	1,251	28,026	296,8
Атмосферный азот[1] (N_2)	(1,257)	28,16	(295,3)
Водород (H_2)	0,090	2,016	4124,0
Окись углерода (CO)	1,250	28,01	296,8
Двуокись углерода (CO_2)	1,977	44,01	188,9
Метан (CH_4)	0,717	16,032	518,8
Водяной пар (H_2O)	(0,804)	18,016	(461)

[1] Атмосферный азот – условный газ, состоящий из азота воздуха вместе с двуокисью углерода и редкими газами, содержащимися в воздухе.

Приложение 3

Массовая изобарная теплоемкость C_{Pi} и массовая изохорная теплоемкость C_{Vi} газов, в зависимости от температуры, *кДж/(кг·К)* [7]

Температура t, ^{0}C	Углекислый газ CO_2		Кислород O_2		Азот N_2	
	$C_{P(CO2)}$	$C_{V(CO2)}$	$C_{P(O2)}$	$C_{V(O2)}$	$C_{P(N2)}$	$C_{V(N2)}$
0	0,8148	0,6259	0,9148	0,6548	1,0392	0,7423
100	0,8658	0,6770	0,9232	0,6632	1,0404	0,7427
200	0,9102	0,7214	0,9353	0,6753	1,0434	0,7465
300	0,9487	0,7599	0,9500	0,6900	1,0488	0,7519
400	0,9826	0,7938	0,9651	0,7051	1,0567	0,7599
500	1,0128	0,8240	0,9793	0,7193	1,0660	0,7691
600	1,0396	0,8508	0,9927	0,7327	1,0760	0,7792
700	1,0639	0,8746	1,0048	0,7448	1,0869	0,7900
800	1,0852	0,8964	1,0157	0,7557	1,0974	0,8005
900	1,1045	0,9157	1,0258	0,7658	1,1078	0,8110
1000	1,1225	0,9332	1,0350	0,7750	1,1179	0,8210
1100	1,1384	0,9496	1,0434	0,7834	1,1271	0,8302
1200	1,1530	0,9638	1,0509	0,7913	1,1359	0,8395
Температура t, ^{0}C	Водяной пар H_2O		Метан CH_4		Воздух	
	$C_{P(H2O)}$	$C_{V(H2O)}$	$C_{P(CH4)}$	$C_{V(CH4)}$	$C_{P(B)}$	$C_{V(B)}$
400	0,9826	0,7938	0,9651	0,7051	1,0567	0,7599
500	1,0128	0,8240	0,9793	0,7193	1,0660	0,7691
600	1,0396	0,8508	0,9927	0,7327	1,0760	0,7792
700	1,0639	0,8746	1,0048	0,7448	1,0869	0,7900
800	1,0852	0,8964	1,0157	0,7557	1,0974	0,8005
900	1,1045	0,9157	1,0258	0,7658	1,1078	0,8110
1000	1,1225	0,9332	1,0350	0,7750	1,1179	0,8210
1100	1,1384	0,9496	1,0434	0,7834	1,1271	0,8302
1200	1,1530	0,9638	1,0509	0,7913	1,1359	0,8395
0	1,8594	1,3980	0,5172	0,3934	1,0036	0,7164
100	1,8728	1,4114	0,5848	0,4610	1,0061	0,7193
200	1,8937	1,4323	0,6704	0,5466	1,0115	0,7243
300	1,9192	1,4574	0,7584	0,6346	1,0191	0,7319
400	1,9477	1,4863	0,8430	0,7192	1,0283	0,7415

500	1,9778	1,5160	0,9210	0,7972	1,0387	0,7519
600	2,0092	1,5474	0,9919	0,8681	1,0496	0,7624
700	2,0419	1,5805	1,0560	0,9322	1,0605	0,7733
800	2,0754	1,6140	1,1129	0,9891	1,0710	0,7842
900	2,1097	1,6483	1,1638	1,0400	1,0815	0,7942
1000	2,1436	1,6823	1,2089	1,0851	1,0907	0,8039
1100	2,1771	1,7158	1,2483	1,1245	1,0999	0,8127
1200	2,2106	1,7488	1,2820	1,1582	1,1082	0,8215

Приложение 4

Плотность ρ, теплопроводность λ, теплоемкость C_P металлов и сплавов (p=0,1 МПа, t=20°C) [5]

Наименование элемента	ρ, кг/м^3	λ, Вт/м·К	C_P, кДж/(кг·К)
Алюминий	2700	29	0,896
Бронза (75% Cu, 25% Sn)	8660	25,9	0,344
Вольфрам	19340	169	0,134
Дюралюминий	2800	164	0,884
Железо	7880	74	0,44
Золото	19310	313	0,130
Калий	870	100	0,737
Кремний	2300	33,7	-
Латунь (70% Cu, 30% Zn)	8520	110,7	0,385
Магний	1760	158	0,975
Медь	8930	390	0,388
Молибден	10214	136,9	0,251
Натрий	975	109	1,20
Никель	8900	67,5	0,427
Олово	7300	66,3	0,222
Платина	21460	69,8	0,132
Свинец	11350	35,1	0,127
Серебро	10500	419	0,234
Сталь 45	7794	32	0,560
Сталь углеродистая (C=0,5 %)	7830	53,6	0,465
Сталь нержавеющая 1Х18Н9Т	7900	16	0,502

Титан	4540	15,1	0,531
Углерод, графит	1700-2300	174	0,67
Цинк	7150	113	0,384
Чугун (с=4%)	7270	51,9	0,419

Приложение 5

Плотность ρ, теплопроводность λ, теплоемкость C_p некоторых неметаллических материалов [4]

Наименование материала	t, ^{0}C	ρ, кг/м^3	λ, Вт/м·К	C_P, кДж/(кг·К)
Асбошифер	20	1800	0,64	–
Асфальт	30	2120	0,74	1,67
Бетон с щебнем	0	2000	1,28	0,84
Бетон сухой	0	1600	0,84	–
Бумага обыкновенная	20	-	0,14	1,51
Вата хлопчатобумажная	30	80	0,042	–

Приложение 6

Плотность ρ, теплопроводность λ и предельная температура t применения теплоизоляционных и огнеупорных материалов и изделий [4]

Наименование материала или изделия	ρ, кг/м^3	λ, Вт/м·К	t, ^{0}C
Материалы			
Асбест	500	0,107+0,00019·t	700
Асбозонолит	520	0,143+0,00019·t	700
Асбозурит	700	0,162+0,000169·t	300
Асбослюда	600	0,120+0,000148·t	600
Асботермит	560	0,109+0,000145·t	550
Диатомит	450	0,091+0,00028·t	880
Зонолит	200	0,072+0,000262·t	1100
Минеральная стеклянная вата	200	0,047+0,87·t	500
Новоасбозурит	600	0,144+0,00014·t	250
Ньювель	450	0,87+0,00064·t	350

Совелит	500	0,09+0,00087·t	450
Ферригипс (паста феррои)	500	0,101+0,00015·t	600
Шлаковая вата (сорт 0)	200	0,06+0,000145·t	750
Изделия			
Асбоцементные сегменты	400	0,0919+0,000128·t	450
Вермикулитовые плиты	380	0,081+0,00015·t	700
Вулканитовые плиты	400	0,080+0,00021·t	600
Войлок строительный	300	0,05 при 0 ^{0}C	190
Кирпич диатомитовый	550	0,113+0,00023·t	850
Кирпич динасовый	1500	0,9+0,0007·t	1700
Кирпич керамический красный	1800	0,77 при 0^{0}C	–
Кирпич магнезитовый	2700	4,65-0,0017·t	1700
Кирпич пеношамотный	600	0,1+0,000145·t	1300
Кирпич пенодиатомитовый	230	0,07 при 70^{0}C	700
Кирпич хромитовый	3050	1,3+0,00041·t	1700
Кирпич шамотный	1850	0,84+0,0006·t	1400
Минеральный войлок	250	0,058 при 50^{0}C	–
Пенобетонные блоки	500	0,122 при 50^{0}C	300
Шлаковая и минеральная пробка	270	0,064 при 50^{0}C	150

Приложение 7

Физические свойства сухого воздуха
(p = 760 мм рт. ст.) [4]

T	ρ	C_P	$\lambda\cdot10^{-2}$	$a\cdot10^{-6}$	$\mu\cdot10^{-6}$	$\nu\cdot10^{-6}$	Pr	$\beta\cdot10^{-3}$
^{0}C	кг/м^3	кДж/кг·К	Вт/м·К	м^2/с	н·с/м^2	м/с	-	1/К
-50	1,584	1,013	2,04	12,7	14,6	9,23	0,728	4,484
-40	1,515	1,013	2,12	13,8	15,2	10,04	0,728	4,292
-30	1,453	1,013	2,2	14,9	15,7	10,8	0,723	4,115
-20	1,395	1,009	2,28	16,2	16,2	12,79	0,716	3,952
-10	1,342	1,009	2,36	17,4	16,7	12,43	0,712	3,802
0	1,293	1,005	2,44	18,8	17,2	13,28	0,707	3,663
10	1,247	1,005	2,51	20	17,6	14,16	0,705	3,534
20	1,205	1,005	2,59	21,4	18,1	15,06	0,703	3,413
30	1,165	1,005	2,67	22,9	18,6	16	0,701	3,3
40	1,128	1,005	2,76	24,3	19,1	16,96	0,699	3,195
50	1,093	1,005	2,83	25,7	19,6	17,95	0,698	3,096
60	1,060	1,005	2,9	27,2	20,1	18,97	0,696	3,003

70	1,029	1,009	2,96	28,6	20,6	20,02	0694	2,915
80	1,000	1,009	3,05	30,2	21,1	21,09	0,692	2,832
90	0,972	1,005	3,13	31,9	21,5	22,1	0,690	2,755
100	0,946	1,009	3,21	33,6	21,9	23,13	0,688	2,681
120	0,898	1,009	3,34	36,8	22,8	25,45	0,686	2,544
140	0,854	1,013	3,49	40,3	23,7	27,8	0,684	2,421
160	0,815	1,017	3,64	43,9	24,5	30,09	0,682	2,309
180	0,779	1,022	3,78	47,5	25,3	32,49	0,681	2,208
200	0,746	1,026	3,93	51,4	26	34,85	0,68	2,114
250	0,674	1,038	4,27	61	27,4	40,61	0,677	1,912
300	0,615	1,047	4,60	71,6	29,7	48,33	0,674	1,745

Приложение 8

Физические свойства воды на линии насыщения

t	ρ	C_p	λ	$a \cdot 10^{-6}$	$\mu \cdot 10^{-6}$	$\nu \cdot 10^{-6}$	$\beta \cdot 10^{-4}$
°C	кг/м^3	кДж/(кг·К)	Вт/(м·К)	м^2/с	Н·с/м^2	м^2/с	1/К
0	999,9	4,212	0,560	13,2	1788	1,789	0,63
10	999,7	4,191	0,580	13,8	1306	1,306	0,70
20	998,2	4,183	0,597	14,3	1004	1,006	1,82
30	995,7	4,174	0,612	14,7	801,5	0,805	3,21
40	992,2	4,174	0,627	15,1	653,3	0,659	3,87
50	988,1	4,174	0,640	15,5	549,4	0,556	4,49
60	983,1	4,179	0,650	15,8	469,9	0,478	5,11
70	977,8	4,187	0,662	16,1	406,1	0,415	5,70
80	971,8	4,195	0,669	16,3	355,1	0,365	6,32
90	965,3	4,208	0,676	16,5	314,9	0,326	6,95
100	958,4	4,220	0,684	16,8	282,5	0,295	7,52
110	951,0	4,233	0,685	17,0	259,0	0,272	8,08
120	943,1	4,250	0,686	17,1	237,4	0,252	8,64
130	934,8	4,266	0,686	17,3	217,8	0,233	9,19
140	926,1	4,287	0,685	17,2	201,1	0,217	9,72
150	917,0	4,313	0,684	17,3	186,4	0,203	10,3
°C	кг/м^3	кДж/(кг·К)	Вт/(м·К)	м^2/с	Н·с/м^2	м^2/с	1/К
160	907,4	4,346	0,681	17,8	173,6	0,191	10,7
170	897,3	4,380	0,676	17,2	162,8	0,181	11,3
180	886,9	4,417	0,672	17,2	153,0	0,173	11,9
190	876,0	4,459	0,664	17,2	144,2	0,165	12,6
200	863,0	4,505	0,658	17,0	136,4	0,158	13,3

Приложение 9

Коэффициенты C, m и ε
в зависимости от условий теплоотдачи [1]

Условия теплоотдачи	C	m	ε	Определяющий размер
Вертикальные пластина и труба				
$Gr \cdot Pr = 10^3 \ldots 10^9$	0,8	0,25	$[1+(1+1/\sqrt{Pr})^2]$	Длина трубы, пластины
$Gr \cdot Pr > 10^9$	0,15	0,33	1	
Горизонтальная труба				
$10^{-3} \le Gr \cdot Pr \le 10^3$	0,18	0,125	1	Диаметр трубы
$10^3 \le Gr \cdot Pr \le 10^8$	0,5	0,25	1	
Горизонтальная пластина при ламинарном режиме течения				
охлаждение сверху	0,54	0,25	1	Короткая сторона пластины
охлаждение снизу	0,27	0,25	1	

Приложение 10

Термодинамические свойства воды и водяного пара в состоянии насыщения (по давлениям) [2]

$P_П$	$t_П$	v'	v''	h'	h''
Па	^0C	$м^3/кг$	$м^3/кг$	кДж/кг	кДж/кг
1000	6,982	0,001	129,208	29,33	2513,8
5000	32,9	0,001005	28,196	137,77	2561,2
90000					
95000					
100000	99,63	0,001043	1,6946	417,51	2675,7
105000					
110000					
115000					
120000					
10^6	179,88	0,001127	0,1943	762,6	2777
$2{,}21 \cdot 10^7$	374,06	0,002864	0,003461	2945	2147,6

$P_П$	r	s'	s''		
Па	кДж/кг	кДж/кг·К	кДж/кг·К		
1000	2484,5	0,1060	8,9756		
5000	2423,2	0,4762	8,3952		
90000					
95000					
100000	2258,2	1,3027	7,3608		
105000					
110000					
115000					
120000					
10^6	2014,4	2,1382	6,5847		
$2{,}21\cdot10^7$	102,6	4,3460	4,5048		

Содержание

Введение
Основные правила техники безопасности

Лабораторная работа №1: Измерение температуры веществ

Лабораторная работа №2 Измерение давления и расхода жидкостей и газов.

Лабораторная работа № 3 Изучение законов идеальных газов

Лабораторная работа № 4 Изучение способов задания и определение параметров газовых смесей

Лабораторная работа № 5 Определение теплоемкости веществ

Лабораторная работа № 6 Определение показателя адиабаты воздуха

Лабораторная работа № 7 Определение параметров идеальных газов при изменении их состояния в различных термодинамических процессах

Лабораторная работа № 8 Изучение холодильной установки и испытание теплообменника – охладителя молока

Лабораторная работа № 9 Изучение процессов теплопроводности при различных условиях теплообмена

Лабораторная работа № 10 Определение коэффициента теплопроводности теплоизоляционных материалов методом трубы

Лабораторная работа №11 Изучение процессов теплоотдачи при различных условиях теплообмена

Лабораторная работа № 12 Определение коэффициента теплоотдачи при свободной конвекции воздуха

Лабораторная работа № 13 Изучение процессов теплопередачи при различных условиях теплообмена

Лабораторная работа № 14 Изучение работы испарительного циркуляционного контура

Литература

Приложения

Учебное издание

ТЕПЛОТЕХНИКА

Методические указания

Издается в авт. редакции

Компьютерная верстка *А.Н. Попескул*

Набор *А.Н. Попескул*

Усл. печатных листов – 8,2. Тираж 10 экз.