

Министерство сельского хозяйства РФ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Вологодская государственная
молочнохозяйственная академия имени Н.В. Верещагина»

Инженерный факультет

Кафедра энергетических средств и технического сервиса

ТЕПЛОТЕХНИКА

*Методические указания
для выполнения лабораторных работ
студентам, обучающимся по направлению подготовки
35.03.06 – Агроинженерия*

Вологда – Молочное
2023

УДК 621.1 (71)
ББК 31.3р30
Т34

Составитель:

канд. техн. наук, доцент кафедры энергетических средств
и технического сервиса ***А.Л. Бирюков***

Рецензенты:

канд. техн. наук, доцент кафедры технические системы в агробизнесе
Р.А. Шушков;

канд. техн. наук, доцент кафедры технические системы в агробизнесе
Е.А. Берденников

Т34 **Теплотехника:** Методические указания / Сост.
А. Л. Бирюков. – Вологда–Молочное : Вологодская ГМХА, 2023. –
45 с.

Методические указания для выполнения лабораторных работ составлены в соответствии с требованиями программы курса «Теплотехника» для студентов, обучающихся по направлению подготовки 35.03.06 – Агроинженерия.

В пособии представлены указания для выполнения лабораторных работ.

Печатается по решению редакционно-издательского совета Вологодской государственной молочнохозяйственной академии имени Н.В. Верещагина.

УДК 621.1 (71)
ББК 31.3р30

© Зефирова И.В., Бирюков А.Л., 2023
© ФГБОУ ВО Вологодская ГМХА, 2023

Введение

При изучении дисциплины «Теплотехника» программой предусмотрены лекции и лабораторные занятия. При прохождении лекционного курса необходимо составлять конспект по каждой теме.

По разделам дисциплины для самостоятельного изучения после его проработки необходимо написать реферат. Это поможет лучше усвоить материал программы курса «Теплотехника».

Цель лабораторно-практических занятий – более прочное и глубокое усвоение студентами теоретических положений курса, а также приобретение ими навыков расчета практических задач и проведения лабораторных исследований.

К сдаче зачета допускаются студенты, успешно выполнившие контрольные работы и требуемый объем лабораторных работ.

Лабораторная работа 1

ИЗМЕРЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ

Цель работы – изучить конструктивные особенности и принцип действия приборов для измерения давления.

Задание:

- 1) Изучить конструктивные особенности и принцип действия приборов для измерения давления;
- 2) Сделать заключение о преимуществах и недостатках различных способов измерения давления, а также о возможности применения в различных устройствах.

Приборы для измерения давления по принципу действия делят на четыре основные группы: жидкостные, измеряющие давление высотой уравнивающего столба жидкости; пружинные, где давление оценивают по деформации различного рода упругих элементов; грузопоршневые, в которых измеряемое давление уравнивается давлением, создаваемым массой грузов и поршня; электрические, работа которых основана на зависимости электрических параметров преобразователя от измеряемого давления.

Жидкостные манометры используются для измерения небольших значений избыточных давлений, вакуума или разности

давлений. Эти приборы просты по устройству, однако дают достаточно точные показания.

Они бывают двух видов: U-образные и чашечные. Разновидностью последних являются микроманометры с наклонной трубкой, применяемые для измерения малых давлений или разрежений.

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

В U-образном манометре (рис. 1, а) избыточное давление или разрежение (Па) уравнивается столбом жидкости h (м) и определяется по формуле:

$$P = h(\rho - \rho_{cp})g, \quad (1)$$

где ρ – плотность рабочей жидкости, кг/м³;

ρ_{cp} – плотность среды над рабочей жидкостью, кг/м³;

g – ускорение свободного падения, м/с².

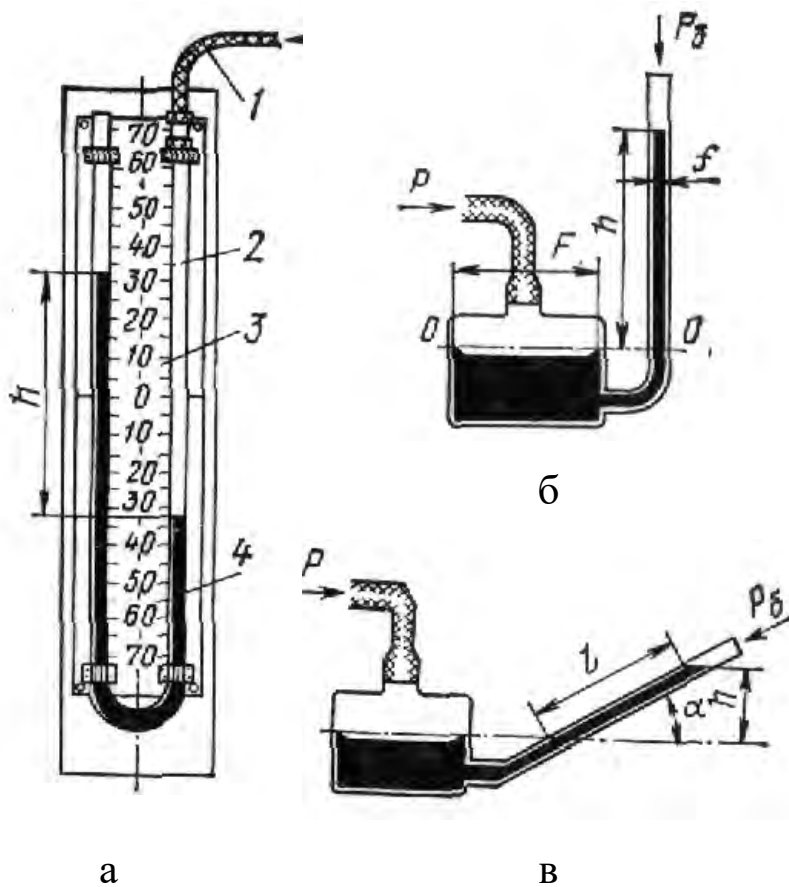
Обычно $\rho > \rho_{cp}$, поэтому выражение (1) упрощается и имеет вид:

$$P = h\rho g. \quad (2)$$

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

В чашечном манометре (рис. 1, б) давление измеряется положением уровня жидкости в одной узкой трубке, а изменением высоты жидкости в широком сосуде обычно пренебрегают, но если отношение площадей сечений измерительной трубки и сосуда $f/F > 0,01$, то формула (2) приобретает вид:

$$P = h\rho g(1 + f/F). \quad (3)$$



Р и с. 1. Жидкостные манометры:

а) U-образный манометр:

1 – резиновая трубка;

2 – стеклянная трубка;

3 – шкала; 4 – рабочая жидкость;

б) чашечный манометр;

в) микроманометр с наклонной трубкой

При использовании микроманометра с наклонной трубкой (рис. 1, в) показания пересчитывают по формуле:

$$h = l \cdot \sin \alpha, \quad (4)$$

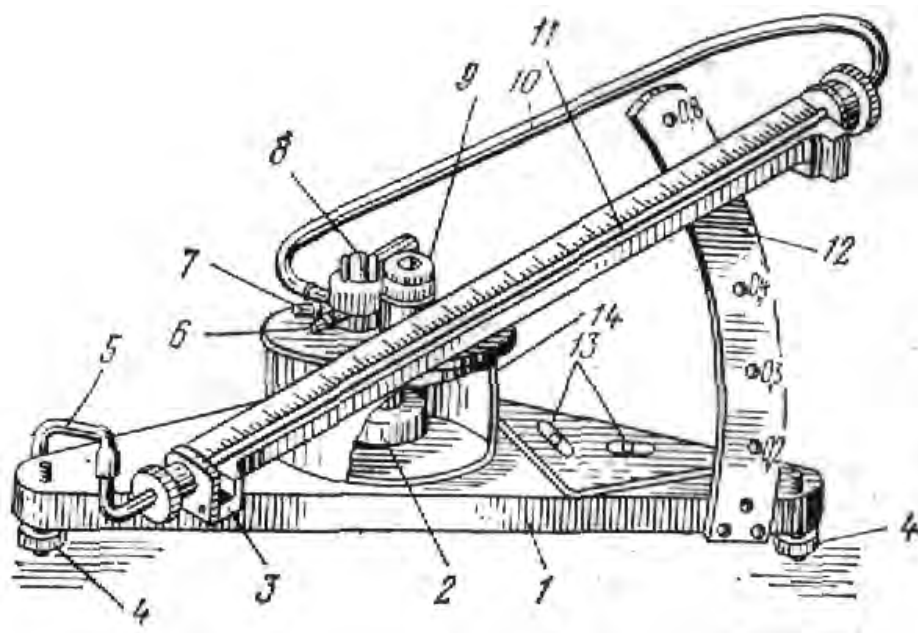
где l – длина столба жидкости в трубке;

α – угол наклона трубки горизонту.

Малые давления (до 1,96 кПа) с большой точностью можно измерить при помощи микроманометра типа ММН, устройство которого показано на рис. 2. На металлической плите 1 установлен стальной цилиндрический резервуар 14, соединенный резиновой трубкой 5 с нижней частью измерительной стеклянной трубки 11, закрепленной на кронштейне 3, который может поворачиваться на оси. Отверстия в дугообразной стойке 12 позволяют фиксировать кронштейн с трубкой под различными углами наклона к плите прибора, установленной строго горизонтально по двум уровням 13. Цифры 0,2; 0,3; 0,4; 0,6; 0,8, указанные около отверстий обозначают постоянную прибора $K = \rho g \sin \alpha$.

На крышке резервуара укреплены трехходовой кран 8, сообщающийся с верхним концом измерительной трубки, и корректор

нуля 9 для установки уровня рабочей жидкости на нулевое деление шкалы.



Р и с. 2. Микроманометр типа ММН:

1 – плита; 2 – поршень; 3 – кронштейн; 4 – регулировочный винт; 5, 10 – резиновые трубки; 6, 7 – штуцера; 8 – трехходовой кран; 9 – корректор нуля; 11 – измерительная трубка; 12 – стойка; 13 – уровни; 14 – цилиндрический резервуар

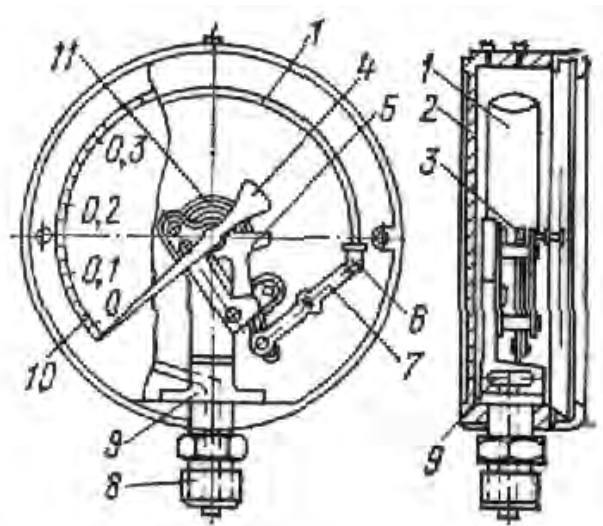
При соответствующих положениях трехходового крана через штуцеры, вмонтированные в его корпус, измеряются давление, разрежение и перепад давлений, а также проверяется нуль прибора.

Рабочей жидкостью микроманометра является этиловый спирт ($\rho=809,5 \text{ кг/м}^3$ при $t=20^\circ\text{C}$), слегка подкрашенный метиловым красным красителем.

В пружинных приборах чувствительными элементами могут быть трубчатые одно- или многовитковые пружины, мембраны, мембранные коробки и сильфоны. На рис. 3 изображен манометр, упругий элемент которого выполнен в виде пружинной трубки овального сечения, одним концом жестко соединенной с держателем 9, укрепленным в корпусе 2 манометра.

Другой конец пружинной трубки, закрытый пробкой 6 с шарнирной осью, поводком 7 соединен с зубчатым сектором 5 и шестерней 3, укрепленной неподвижно на оси вместе с указательной стрелкой 4. Спиральная пружинка 11 служит для устранения влияния зазора в зубчатом зацеплении. При помощи штуцера 8 манометр присоединяется к сосуду, давление в котором необхо-

димо измерить. При изменении давления пружинная трубка изменяет свою кривизну и поворачивает стрелку, показывающую значение давления на шкале 10.



Р и с. 3. Пружинный манометр:

1 – трубчатая пружина; 2 – корпус; 3 – шестерня; 4 – стрелка;
5 – зубчатый сектор; 6 – пробка с шарнирной осью; 7 – поволок;
8 – штуцер; 9 – держатель; 10 – шкала; 11 – спиральная пружинка

Аналогичны по устройству трубчатые вакуумметры и мановакуумметры.

В грузопоршневых манометрах измеряемое давление определяется нагрузкой на поршень, который перемещается в среде, находящейся под давлением. Они применяются как устройства высокой точности для проверки и градуировки пружинных манометров.

Электрические манометры и вакуумметры применяют при лабораторных исследованиях для измерения сверхвысоких давлений, глубокого вакуума или быстро изменяющихся давлений (например, в цилиндрах двигателей внутреннего сгорания).

В производственных условиях такие приборы применяют крайне редко.

Сверхвысокие давления (несколько сотен мегапаскалей) измеряют манометрами сопротивления. В их преобразователях используются материалы (манганин, константан, платина и др.), электрическое сопротивление которых зависит только от давления.

Глубокий вакуум измеряют емкостными манометрами или манометрами с термосопротивлениями.

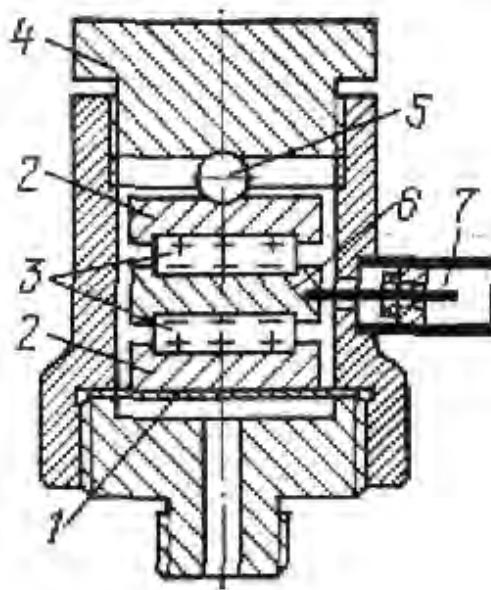
Емкостный манометр (вакуумметр) – это электрический конденсатор переменной емкости, один электрод которого неподвижен, а другой, выполненный в виде металлической мембраны, находится под воздействием давления измеряемой среды. Колебание давления изменяет расстояние между электродами, а следовательно, и емкость конденсатора, которая является мерой давления.

Чувствительным элементом *манометра* (вакуумметра) с *термосопротивлением* служит нагретая платиновая проволока, охлаждение которой зависит от теплопроводности газовой среды, изменяющейся при колебании давления.

Уменьшение абсолютного давления уменьшает теплопроводность среды, что вызывает повышение температуры и сопротивления проволоки прибора. По значению сопротивления проволоки определяют значение вакуума.

При измерениях быстро изменяющихся давлений применяют манометры, в работе которых используется пьезоэлектрический эффект, т.е. появление электрических зарядов на поверхностях кристаллов некоторых диэлектриков (кварца, сегнетовой соли, специальной керамики и др.) при их сжатии в определенном направлении.

Устройство преобразователя *пьезоэлектрического манометра* показано на рис. 4.



Р и с. 4. Преобразователь пьезоэлектрического манометра:

- 1 – мембрана; 2 – опоры; 3 – кварцевые пластинки;
- 4 – пробка; 5 – шарик; 6 – электрод; 7 – проводник

Две кварцевые пластинки 3 и находящийся между ними электрод (токосъемник) б, зажатые между металлическими опорами 2, помещены внутри корпуса преобразователя.

Давление измеряемой среды воспринимается металлической мембраной 1, предохраняющей внутреннюю полость преобразователя от проникновения среды.

От мембраны давление передается через нижнюю металлическую опору 2 на кварцевые пластинки, расположенные так, что заряд отрицательной полярности (прямо пропорциональный давлению) возбуждается на электроде б и по проводнику 7 подается для измерения через электронный усилитель постоянного тока на осциллограф.

Положительные заряды через корпус преобразователя отводятся на землю. Равномерное контактное давление между кварцевыми пластинками и электродом регулируется пробкой 4 через шарик 5. [1]

Пьезоэлектрический манометр не может измерять постоянные величины давления, так как электрический сигнал с пьезокристалла появляется только во время его деформации.

Лабораторная работа 2

ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ

Цель работы – изучить конструктивные особенности и принцип действия приборов для измерения температуры.

Задание:

- 1) Изучить конструктивные особенности и принцип действия приборов для измерения температуры;
- 2) Сделать заключение о преимуществах и недостатках различных способов измерения температуры, а также о возможности применения в различных устройствах.

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

К таким измерителям относятся: термометры расширения, манометрические термометры, термометры сопротивления, термоэлектрические приборы и пирометры излучения.

Жидкостные стеклянные термометры – самые простые, но достаточно точные и наиболее распространенные приборы для измерения температуры.

Действие этих термометров основано на тепловом расширении жидкости, заключенной в стеклянном резервуаре.

В качестве рабочей жидкости используется чаще всего ртуть (при измерении температуры от -35 до $+600^{\circ}\text{C}$) или этиловый, спирт (для более низких температур – от -80 до $+80^{\circ}\text{C}$).

В схемах сигнализации и автоматического регулирования температуры применяют ртутные контактные термометры.

Один электрический контакт термометра впаян в нижней точке капилляра и всегда соприкасается с ртутью, другие (обычно один или два) впаяны в капилляр на определенных отметках шкалы и соприкасаются с ртутью только при соответствующих значениях температур измеряемой среды.

Если среда в аппарате или трубопроводе находится под избыточным давлением или вакуумом, то в местах измерения температуры устанавливают жидкостные термометры с защитными гильзами.

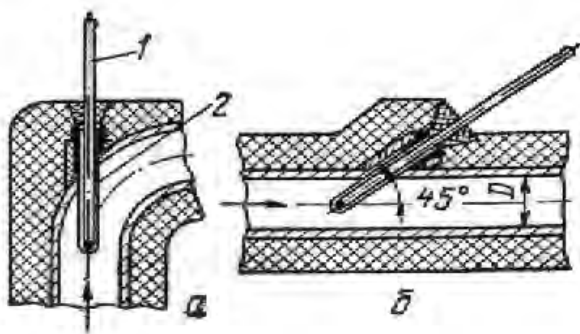
Гильзы делают тонкостенными из металла, обладающего сравнительно низкой теплопроводностью (например, из стали).

Для улучшения теплообмена пространство между резервуаром термометра и гильзой заполняют машинным маслом (при температуре среды до 150°C) или мелкими опилками из красной меди (при более высокой температуре).

Гильзы устанавливают в коленах или отводах трубопровода навстречу потоку, в местах наибольших скоростей его движения. Глубина погружения гильз в трубопровод или аппарат должна быть не менее 85 мм.

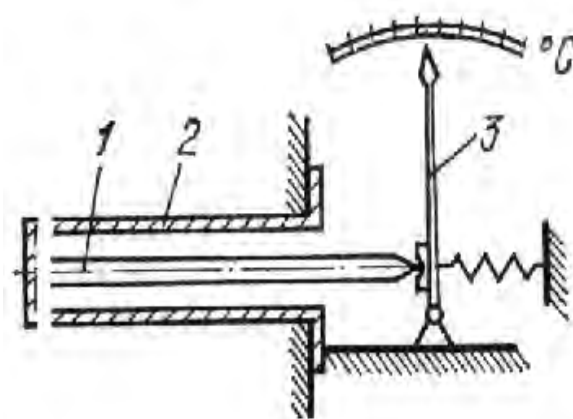
Поэтому в трубах малого диаметра гильзы устанавливают наклонно (под углом не менее 30°) к оси трубы.

Примеры установки жидкостных стеклянных термометров в трубопроводах диаметром до 200 мм показаны на рис. 5.



Р и с. 5. Установка жидкостных
стеклянных термометров
в трубопроводах диаметром
до 200 мм:

a – по оси трубопровода; *б* – наклонно к
оси горизонтального трубопровода; 1 –
термометр; 2 – термометровая гильза



Р и с. 6. Дилатометрический
термометр:

1 – стержень из инвара; 2 – трубка ла-
тунная; 3 – показывающий механизм

Дилатометрические термометры. Действие этих термометров основано на использовании разности удлинений стержней, изготовленных из двух различных металлов, которые должны значительно отличаться друг от друга коэффициентами линейных расширений. Обычно применяются такие пары: латунь – сталь ($\alpha_{\text{лат}} = 1,9 \cdot 10^{-6}$, $\alpha_{\text{ст}} = 1,2 \cdot 10^{-6}$) или латунь – инвар ($\alpha_{\text{инв}} \sim 0$). Принцип устройства дилатометрического термометра показан на рис. 6.

Стержень 1 выполняется из инвара или стали, коэффициент линейного расширения которых намного меньше, чем у латуни, из которой изготовлена трубка 2, закрытая с одной стороны.

Стержень одним концом укреплен на дне трубки, а другой его конец касается призмы показывающего механизма 3. В зависимости от температуры среды трубка изменяет свою длину, а вместе с ней перемещается и стержень, воздействуя на показывающий механизм.

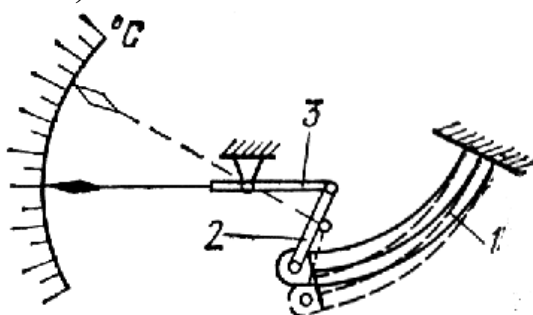
Степень перемещения стержня Δl зависит от его длины l , изменения температуры Δt и разности коэффициентов линейного расширения $\Delta \alpha$ металлов, из которых выполнен термометр:

$$\Delta l = \Delta \alpha \cdot l \cdot \Delta t . \quad (5)$$

Так, для термометра, сделанного из латунной трубки и инварного стержня, при $l=300$ мм и $\Delta t=100^\circ\text{C}$ перемещение свободного конца стержня $\Delta l=(1,9 - 0)10^{-5} \cdot 300 \cdot 100=0,57$ мм.

Это малое перемещение через систему рычагов увеличивает-ся и отмечается по температурной шкале прибора.

Биметаллические термометры. Принцип действия их основан на различии коэффициентов теплового расширения металлов, из которых изготовлена биметаллическая пластина, изгибающаяся при нагревании (рис. 7).

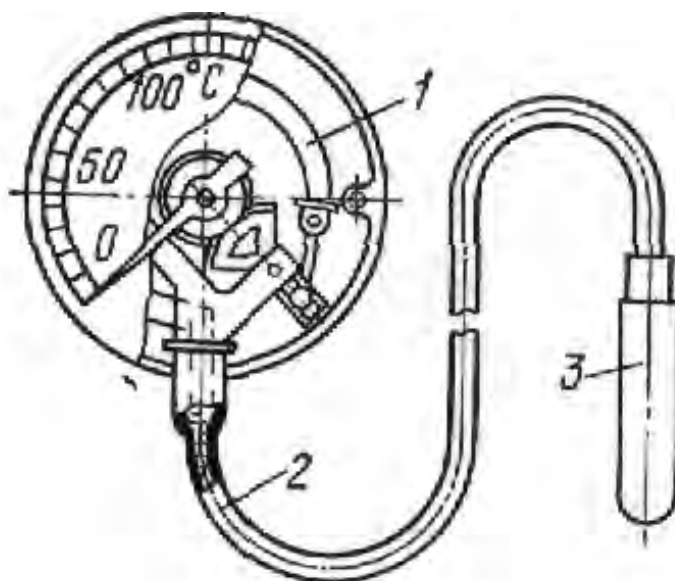


Р и с. 7. Биметаллический термометр:

1 – биметаллическая пластина; 2 – рычаг; 3 – показывающая стрелка

Манометрические термометры применяют для дистанционного измерения температуры. Действие их основано на увеличении давления жидкости, газа или пара с повышением температуры.

Манометрический термометр (рис. 8) состоит из термобаллона 3, воспринимающего изменение температуры измеряемой среды, манометра 1, проградуированного в единицах температуры ($^{\circ}\text{C}$), и соединительной капиллярной трубки 2, длина которой в газовых термометрах допускается до 60 м.



Р и с. 8. Манометрический термометр:

1 – манометр; 2 – капиллярная трубка; 3 – термобаллон

В жидкостных манометрических термометрах рабочим веществом служат чаще всего ртуть, а также метиловый спирт, глицерин и другие.

Газовые термометры заполняются инертным газом – азотом; паровые – легкокипящей жидкостью (различными фреонами, хлорметилом, хлорэтилом, этиловым эфиром и др.).

В жидкостных и газовых термометрах рабочее вещество заполняет всю замкнутую систему термобаллон – манометр.

В паровых легкокипящая жидкость заполняет только $\frac{2}{3}$ объема термобаллона, а в остальной его части, капилляре и полости трубчатой пружины манометра находятся насыщенные пары этой жидкости (капиллярная трубка и пружина часто заполняются глицерином в смеси со спиртом или водой).

При повышении температуры возрастает давление внутри термобаллона, которое через капиллярную трубку передается пружине манометра.

Деформация пружины с помощью передаточного механизма преобразуется в перемещение стрелки, указывающей температуру на шкале прибора.

Пределы температур, измеряемых манометрическим термометром, зависят от вида его рабочего вещества.

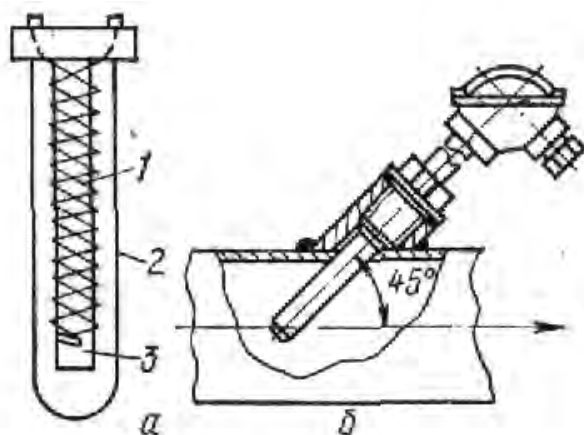
Так, для ртути возможен диапазон температур от -25 до $+600^{\circ}\text{C}$, хлорметила – от -25 до $+75^{\circ}\text{C}$, хлорэтила – от 0 до 120°C , азота – от -160 до $+600^{\circ}\text{C}$.

Термометры сопротивления.

Принцип действия этих термометров, дающих высокую степень точности измерений, основан на свойстве металлов изменять свое электрическое сопротивление с изменением температуры.

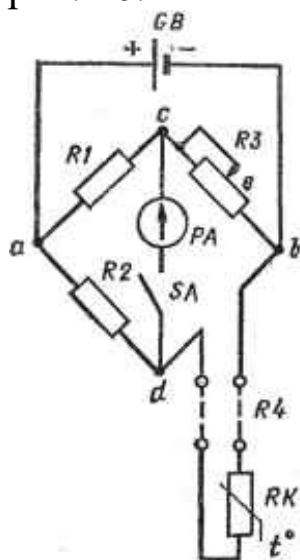
К достоинствам термосопротивлений относятся также возможность автоматической записи изменения температуры при помощи самопишущих приборов, централизация контроля температуры одним измерительным прибором от нескольких термометров сопротивлений и передача показаний на значительное расстояние от места измерения температуры.

Термометр сопротивления (рис. 9) состоит из тонкой платиновой или медной проволоки 1, бифилярно намотанной на каркас 3 из слюды, керамики или пластмассы и защищенной герметичным кожухом 2 от механических повреждений и агрессивного воздействия среды.



Р и с. 9. Термометр сопротивления:
a – схема термометра; *б* – установка термометра на трубопроводе:
 1 – проволока; 2 – защитный кожух; 3 – каркас.

Платиновые термометры сопротивления применяют для измерения температур в пределах от -200 до $+650^{\circ}\text{C}$, медные – от -50 до $+180^{\circ}\text{C}$. Определение температуры среды сводится к измерению сопротивления термометра. В качестве измерительных приборов применяют потенциометры, уравновешивающие мосты и логометры. Наиболее удобен потенциометрический метод, схема которого показана на рис. 10.



Р и с. 10. Схема измерения сопротивления термометра потенциометрическим методом

Термометр сопротивления R_K включают в цепь источника постоянного тока последовательно с регулировочным сопротивлением R_3 . Устанавливая движок резистора R_3 , добиваются нулевого значения вольтметра R_A в диагонали моста.

Помещают термометр сопротивления в точку измерения температуры и по шкале вольтметра определяют ее значение. Предварительно необходимо произвести тарировку шкалы вольтметра. Сопротивления R_1 и R_2 подбираются так, чтобы токи в плечах моста были примерно равны. Величину сопротивления термометра определяют по формуле:

$$R_K = R_3 \frac{R_2}{R_1} \quad (6)$$

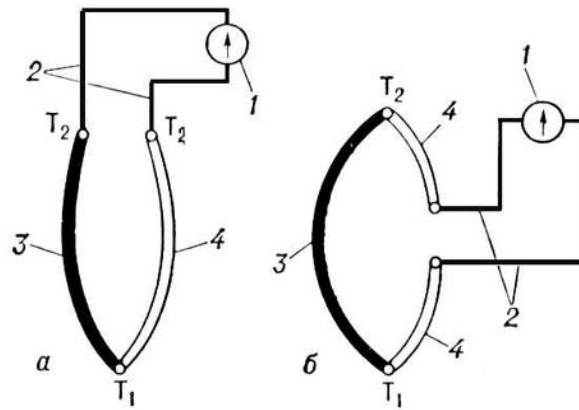
Термоэлектрические термометры – измерительные приборы, действие которых основано на термоэлектрическом эффекте, т.е. возникновении термоэлектродвижущей силы (термо-ЭДС) в замкнутом контуре из двух разнородных проводников, когда их спаянные концы находятся при различных температурах. Наиболее распространены термопары хромель-алюмелевые, хромель-копелевые, медь-константановые, железо-константановые, платино-платинородиевые.

Если поддерживать температуру одного спая термопары постоянной (например, равной 0°C , когда спай помещен в сосуд Дьюара с тающим льдом), то значение термо-ЭДС будет зависеть только от температуры другого (рабочего) спая, который помещают в измеряемую среду.

Прямое измерение термо-ЭДС осуществляется магнитоэлектрическим милливольтметром (гальванометром), имеющим двойную (милливольттовую и градусную) или одинарную (градусную) шкалу.

На схеме, показанной на рис. 11, представлены варианты включения термопар для измерения температур.

Этот метод измерения прост, удобен, но обладает рядом недостатков, основной из которых – влияние сопротивления внешней цепи (милливольтметра, проводов и самой термопары) на показания прибора.



Р и с. 11. Схема термоэлектрического термометра:

а – при измерении температуры объекта относительно температуры окружающей среды; *б* – при измерении относительно 0°C (один спай помещен, например, в сосуд с тающим льдом):

1 – измерительный прибор (гальванометр); 2 – соединительные провода; 3, 4 – проводники термопар (например, хромель–копель)

Этот метод измерения прост, удобен, но обладает рядом недостатков, основной из которых – влияние сопротивления внешней цепи (милливольтметра, проводов и самой термопары) на показания прибора. Добавочными сопротивлениями подгоняют сопротивление внешней цепи к тому значению, при котором проводилась градуировка милливольтметра. Более точные измерения термо-ЭДС дают компенсационные методы с применением потенциометров. Для этих методов измерения сопротивление внешней цепи не имеет значения. Измерения термоэлектрическими термопарами наиболее целесообразны при температурах от 300°C и выше.

Пирометры излучения используют для измерения значительных температур (выше 800°C). Эти приборы не требуют контакта с измеряемой средой. Действие их основано на изменении интенсивности излучения нагретого тела, зависящей от измеряемой температуры. Применяются оптические, радиационные, фотоэлектрические и цветные пирометры. [1] Внешний вид пирометра показан на рис. 12.



Р и с. 12. Пирометр

Лабораторная работа 3

ИЗМЕРЕНИЕ ВЛАЖНОСТИ ВОЗДУХА

Цель работы – изучить конструктивные особенности и принцип действия приборов для измерения температуры.

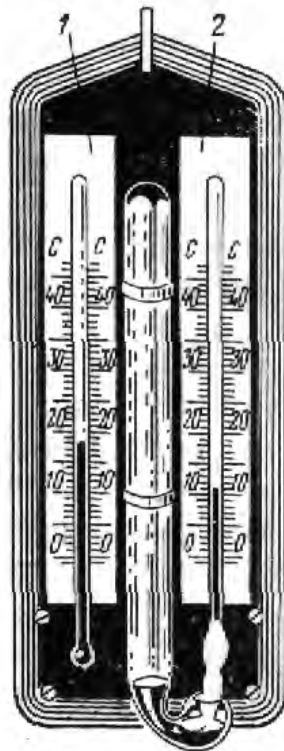
Задание:

- 1) Изучить конструктивные особенности и принцип действия приборов для измерения влажности воздуха;
- 2) Сделать заключение о преимуществах и недостатках различных способов измерения влажности воздуха, а также о возможности применения в различных устройствах.

Основным гигрометрическим показателем влажностного состояния воздуха является относительная влажность, т.е. отношение количества фактически содержащихся в воздухе водяных паров к максимально возможному содержанию их при полном насыщении воздуха при той же температуре, выраженное в процентах.

Относительную влажность воздуха измеряют психрометрами, гигрометрами и гигрографами.

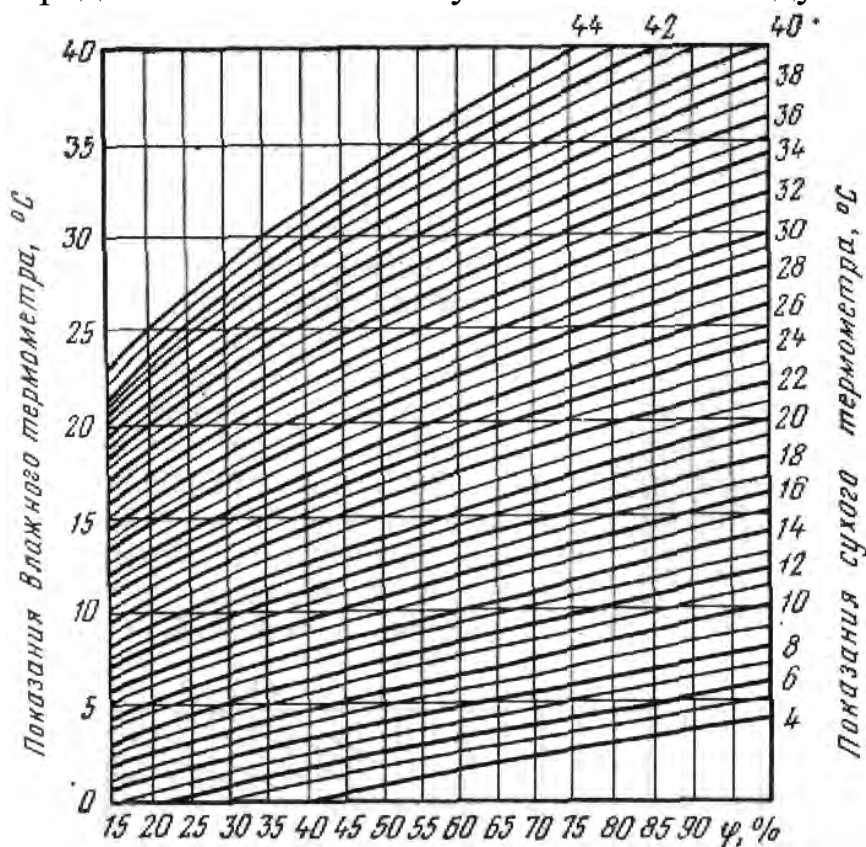
Статический психрометр состоит из двух совершенно одинаковых термометров, укрепленных на одном штативе (рис. 13).



Р и с. 13. Статический психрометр:
1 – сухой термометр; 2 – мокрый термометр

Сухой термометр (левый) показывает температуру окружающего воздуха. Резервуар другого термометра, называемого мокрым, обернут кусочком тонкой гигроскопической ткани, свободный конец которой свернут жгутом и опущен в расширенную часть изогнутой трубки с дистиллированной водой. Расстояние от уровня воды до резервуара термометра равно 2...3 см.

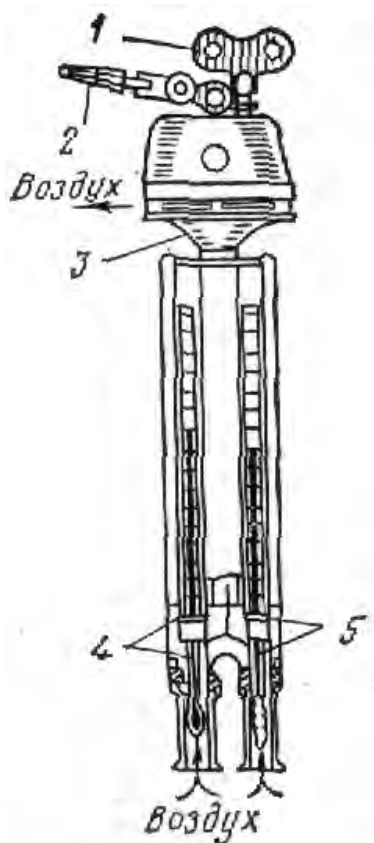
С поверхности резервуара мокрого термометра происходит непрерывное испарение воды, интенсивность которого зависит от влажности окружающего воздуха. Чем суше воздух, тем быстрее испарение со смачиваемого термометра и тем ниже его показания, так как воздух, затрачивая свою теплоту на процесс испарения воды, охлаждает резервуар термометра. По разности показаний сухого и мокрого термометров, пользуясь специальной психрометрической таблицей, прилагаемой к прибору, или номограммой (рис. 14) определяют относительную влажность воздуха φ (%).



Р и с. 14. Номограмма для определения относительной влажности воздуха по показаниям статического психрометра

Во время измерения влажности воздуха психрометр нужно ограждать от источников лучистой теплоты и случайных возмущений воздуха. Продолжительность наблюдения 10...15 мин.

Аспирационный психрометр (рис. 15) – более совершенный и точный прибор по сравнению со статическим.



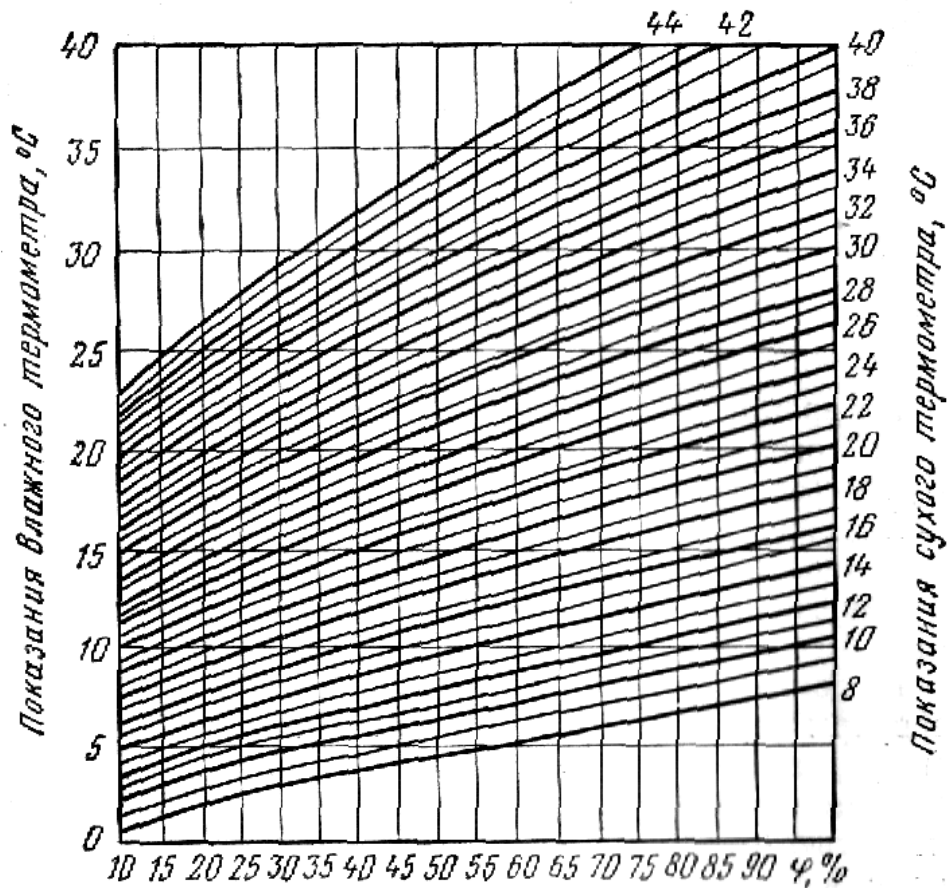
Р и с. 15. Аспирационный психрометр:

- 1 – завод вентилятора;
- 2 – подвеска; 3 – вентилятор;
- 4 – сухой термометр;
- 5 – мокрый термометр

Его показания уже не зависят от колебаний скорости движения окружающего воздуха, потому что резервуары термометров, заключенные в двойные трубчатые оправы, во время измерения омываются принудительным потоком воздуха, движущимся с постоянной скоростью (около 2,5 м/с). Поток этот создается аспиратором (вентилятором) с пружинным заводом, установленным в верхней части прибора.

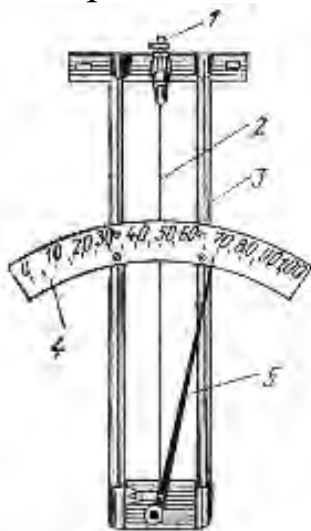
Резервуар мокрого термометра обернут батистом в один слой. Воздух засасывается снизу через трубки, обтекает резервуары термометров и выбрасывается аспиратором через выхлопные щели. За 5 мин до начала наблюдения смачивают дистиллированной водой батист мокрого термометра с помощью резинового баллона с пипеткой, прилагаемого к прибору. При смачивании термометра нужно остерегаться, чтобы вода по соединительной полости не попала на сухой термометр. Смочив термометр, заводят ключом аспиратор и по истечении 4 мин после его пуска регистрируют показания сухого и мокрого термометров.

Относительную влажность воздуха находят по разности показаний термометров, используя психрометрическую таблицу данного психрометра или номограмму (рис. 16).



Р и с. 16. Номограмма для определения относительной влажности воздуха по показаниям аспирационного психрометра

Гигрометр (рис. 17) использует в своей работе деформацию обезжиренного волоса, зависящую от влажности воздуха.



Р и с. 17. Волосной гигрометр:

- 1 – регулировочный винт;
- 2 – волос; 3 – рамка;
- 4 – шкала; 5 – стрелка

При повышении относительной влажности волос удлиняется, и стрелка прибора перемещается вправо, при понижении влажности – волос укорачивается, стрелка отходит влево. Шкала прибора разделена на 100 делений, соответствующих значениям относительной влажности воздуха.

Преимущество волосяного гигрометра по сравнению с психрометрами в том, что им можно определять влажность холодного воздуха, температура которого ниже -10°C . Применение психрометрического метода при таких температурах не дает надежных результатов. [1]

Лабораторная работа 4

ИЗМЕРЕНИЕ РАСХОДА И СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ВЕЩЕСТВА

Цель работы – изучить конструктивные особенности и принцип действия приборов для измерения расхода и скорости движения вещества.

Задание:

- 1) Изучить конструктивные особенности и принцип действия приборов для измерения расхода и скорости движения вещества;
- 2) Сделать заключение о преимуществах и недостатках различных способов измерения расхода и скорости движения вещества, а также о возможности применения в различных устройствах.

Количество вещества, протекающего через данное поперечное сечение трубопровода в единицу времени, называется его расходом. Расход измеряется в единицах, производных от массы (кг/с, кг/ч) или от объема ($\text{м}^3/\text{с}$, $\text{м}^3/\text{ч}$).

Для определения мгновенного расхода жидкости, газа или пара применяются дроссельный и скоростной методы измерений. Средний расход вещества за определенное время измеряют при помощи мерных баков, весов и различных счетчиков.

Дроссельный метод предполагает установку на прямом участке трубопровода какого-либо дроссельного прибора – диафрагмы, сопла, сопла Вентури (рис. 18), создающего некоторое сужение поперечного сечения.

В сужающем устройстве скорость движения потока увеличивается, вследствие чего по закону Бернулли происходит падение давления. Измеряя разность (перепад) давлений перед сужающим устройством и за ним, можно судить о расходе вещества.

Зависимость между массовым расходом (кг/с) вещества и перепадом давлений выражается уравнением:

$$Q_m = \alpha \cdot f \sqrt{2\rho\Delta P} \quad (7)$$

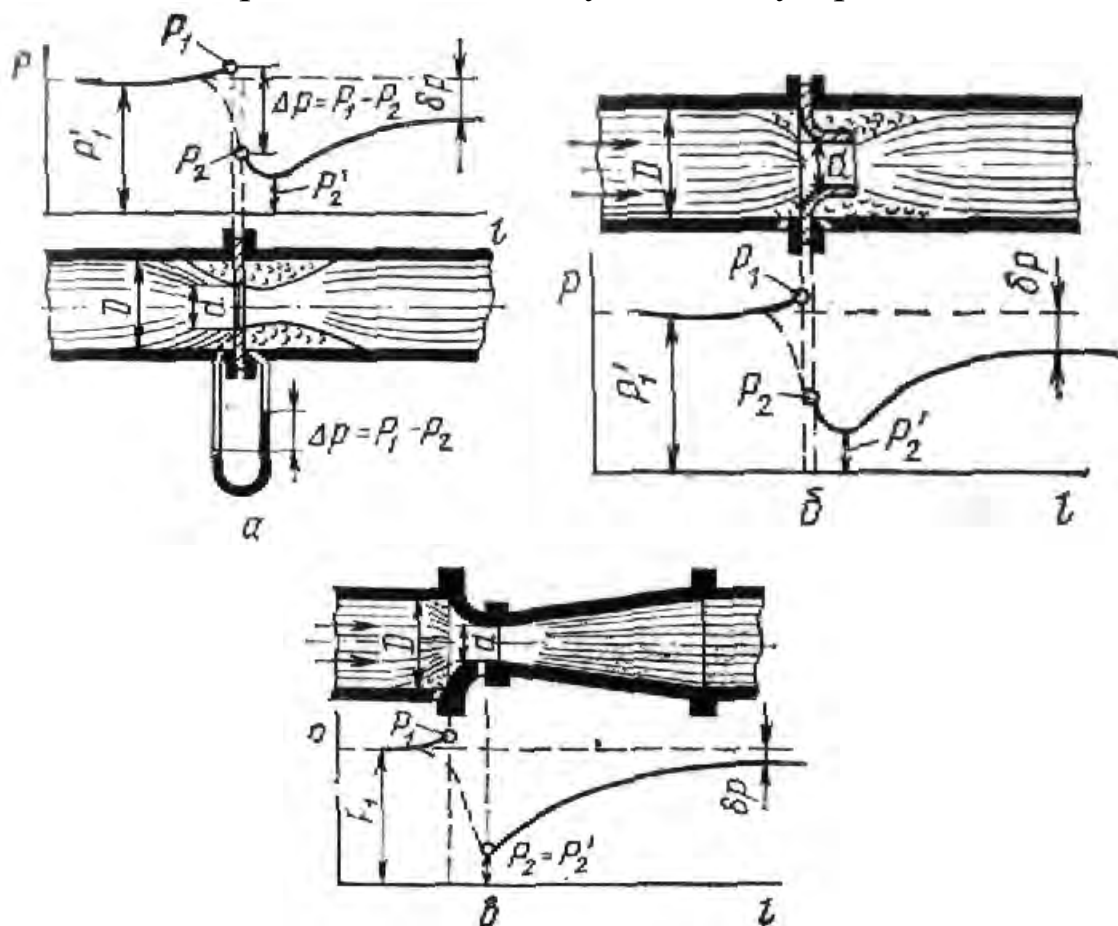
где α – коэффициент расхода, зависящий от конструктивной формы и качества изготовления сужающего устройства, его модуля и критерия Рейнольдса для измеряемого потока;

$f = \pi d^2/4$ – проходное сечение сужающего устройства, м²;

$F = \pi D^2/4$ – сечение трубопровода, м²;

ρ – плотность вещества перед дроссельным прибором, кг/м³;

$\Delta P = P_1 - P_2$ – перепад давлений в сужающем устройстве, Па.



Р и с. 18. Дроссельные приборы для измерения расхода газа, пара или жидкости:

a – диафрагма; *б* – сопло; *в* – сопло Вентури

Уравнение (7) пригодно для несжимаемой жидкости. При измерении расхода газа или пара учитывают увеличение удельного объема измеряемой среды вследствие понижения давления после дроссельного прибора. Кроме этого, принимают во внимание тепловое расширение материала сужающего устройства под действием температуры потока, а при определении перепада давлений в дроссельном приборе учитывают не только плотность рабочей жидкости в дифференциальном манометре, но и плотность среды, находящейся над рабочей жидкостью:

$$\Delta P = h \cdot g (\rho' - \rho_{cp}), \quad (8)$$

где h – показание дифманометра, м;

g – ускорение свободного падения, равное $9,81 \text{ м/с}^2$;

ρ' – плотность рабочей жидкости в дифманометре, кг/м^3 ;

ρ_{cp} – плотность среды в дифманометре над рабочей жидкостью, кг/м^3 .

Объединяя постоянные величины, в том числе ρ' и ρ_{cp} , отнесенные к нормальной температуре среды, окружающей прибор (20°C), в общий для данного прибора числовой коэффициент A , получим расчетные формулы для определения массового (кг/с) и объемного ($\text{м}^3/\text{с}$) расхода вещества:

$$Q_m = A \cdot \alpha \cdot \varepsilon \cdot k_t \cdot d^2 \sqrt{h\rho}, \quad (9)$$

$$Q_v = A \cdot \alpha \cdot \varepsilon \cdot k_t \cdot d^2 \sqrt{h/\rho}. \quad (10)$$

Входящие в формулы (47) и (48) величины A , α , ε , k_t определяют следующим образом.

Значение коэффициента A выбирают из табл. 1.

Таблица 1 – Значения коэффициента A

Измеряемое вещество	Заполнитель дифференциального манометра	A
Вода	Ртуть-вода	0,0444
	Вода-газ	0,0125
Газ (воздух) или пар	Ртуть-газ	0,0461
	Вода-газ	0,0125

Коэффициент расхода определяют по формуле:

$$\alpha = \alpha_u k_1 k_2 k_3, \quad (11)$$

где α_u – исходный коэффициент расхода;

k_1 – поправочный множитель, учитывающий влияние вязкости потока и зависящий от числа Рейнольдса;

k_2 – поправочный множитель на шероховатость трубы;

k_3 – поправочный множитель для диафрагм на недостаточную остроту их входной кромки.

При режимах движения потока, характеризующихся значениями числа Рейнольдса, большими предельного (определенного для данного типа дросселя и его модуля m), т.е. при $Re > Re_{пр}$ вязкость протекающего вещества практически не влияет на его расход, и тогда коэффициент $k_1 = 1$.

В этом случае формула (11) упрощается:

$$\alpha = \alpha_u k_2 k_3. \quad (12)$$

На практике в основном используют стандартные сужающие устройства, не требующие предварительной тарировки, так как они изготовлены на основании расчета всех основных размеров. Стандартные диафрагмы применяют в трубопроводах диаметром $D \geq 50$ мм при значениях модуля $m = 0,05 \dots 0,7$.

Сопла применяют для трубопроводов диаметром D от 50 до 500 мм, их изготавливают с модулем $m = 0,05 \dots 0,65$. Сопла Вентури имеют входную часть с профилем нормального сопла, затем цилиндрическую часть и выходной конус. Их применяют для трубопроводов диаметром $D \geq 50$ мм при значениях модуля $m = 0,05 \dots 0,6$.

Основное преимущество сопел Вентури над другими дроссельными приборами в том, что они дают наименьшую потерю напора δP при дросселировании потока через сужающее устройство.

Точность измерения расхода вещества во многом зависит от правильности установки дроссельного устройства в трубопроводе. Прежде всего его следует тщательно отцентрировать в трубопроводе. До и после сужающего устройства должны быть прямолинейные успокоительные участки трубопровода, длины которых зависят от модуля m и вида местных сопротивлений перед прямолинейным участком. Дроссельные устройства лучше располагать не после местных сопротивлений, а до них, так как в этом случае необходимые длины прямых участков намного меньше.

Перепад давлений до и после дроссельного устройства измеряют дифференциальными манометрами жидкостного и деформационного типа. Жидкостные дифманометры могут быть U-образные, поплавковые, колокольные и кольцевые. Деформационные дифманометры подразделяются на мембранные и сильфонные.

Кроме простейших U-образных стеклянных дифференциальных манометров с визуальным отсчетом уровней рабочей жидкости, все остальные приборы выпускают как показывающими, так и самопишущими.

Скоростной метод измерения расхода вещества основан на определении средней скорости потока через определенное постоянное поперечное сечение.

Объемный ($\text{м}^3/\text{с}$) и массовый ($\text{кг}/\text{с}$) расход вещества в данном сечении потока, исходя из уравнения сплошности, вычисляют по формулам:

$$Q_v = v_{cp}F \quad (13)$$

$$Q_m = v_{cp}\rho f \quad (14)$$

где v_{cp} – средняя скорость потока по данному сечению трубопровода $\text{м}/\text{с}$;

F – площадь поперечного сечения потока, м^2 ;

ρ – плотность вещества, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Приборы для измерения скорости движения вещества.

Среднюю скорость потока можно определить различными скоростными приборами: пневмометрическими или напорными трубками, анемометрами и кататермометрами.

Измерение скорости с помощью *пневмометрической трубки* сводится к измерению динамического давления P_δ (скоростного напора), равного разности полного P_n и статического P_{cm} давлений.

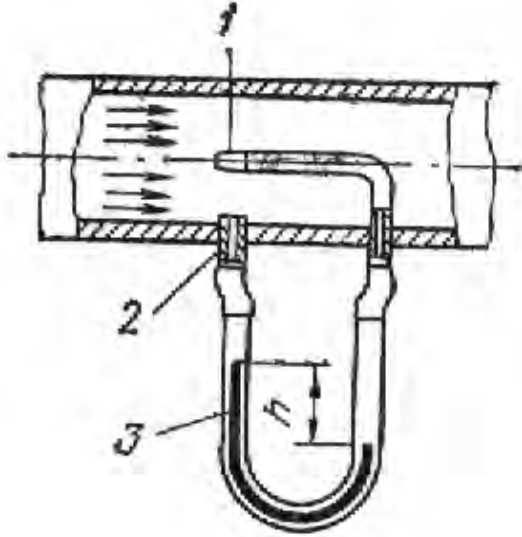
Динамическое давление связано со скоростью потока зависимостью, вытекающей из уравнения Бернулли:

$$P_\delta = P_n - P_{cm} = \rho v^2 / 2, \quad (15)$$

откуда

$$v = 1,41 \sqrt{\frac{P_\delta}{\rho}} \quad (16)$$

Полное давление можно измерить посредством открытой трубки Пито, поставленной навстречу потоку, а статическое – при помощи трубки или отверстия в трубопроводе, направленных перпендикулярно к потоку. Если эти обе трубки присоединить к противоположным концам дифманометра, то разность уровней h рабочей жидкости в нем покажет значение динамического давления (рис. 19).



Р и с. 19. Схема измерения динамического давления в трубопроводе:

- 1 – трубка полного давления;
- 2 – трубка статического давления;
- 3 – дифференциальный манометр

Тогда скорость потока в данной точке можно определить по формуле:

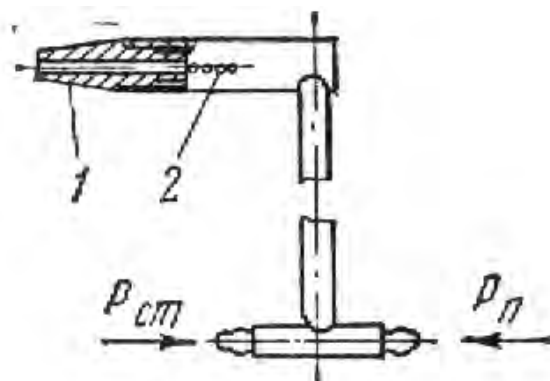
$$v = \sqrt{\frac{2g}{\rho} h(\rho' - \rho_{cp})}, \quad (17)$$

Двойная пневмометрическая трубка (рис. 20) позволяет сразу измерять динамическое давление в любой точке поперечного сечения потока, не прибегая к измерению статического давления через отверстие в стенке трубопровода.

Приемником полного давления в ней является осевое отверстие 1, а приемником статического давления – ряд радиальных отверстий 2.

При измерении расхода пневмометрическими трубками следует устанавливать их в таком сечении трубопровода, где воздушный поток носит установившийся характер.

Для этого должно соблюдаться условие, чтобы до наконечника трубки и после него были прямые участки длиной не менее $4D$.



Р и с. 20. Двойная пневмометрическая трубка:
1 – осевое отверстие; 2 – радиальное отверстие

Динамическое давление, а следовательно, и скорость потока в разных точках поперечного сечения трубопровода различны. Поэтому, чтобы вычислить среднюю скорость потока, надо знать среднее динамическое давление в данном сечении. Для этого его разбивают на участки с равновеликими площадями и измеряют динамическое давление в центре каждого участка. Тогда средняя скорость потока в сечении определится через среднеарифметическое значение динамического давления:

$$v_{cp} = \sqrt{\frac{2g}{\rho} h_{cp} (\rho' - \rho_{cp})} \quad (18)$$

Для трубопроводов круглого сечения среднюю скорость потока определяют проще. Изменение скорости по поперечному сечению трубы зависит от характера движения измеряемой среды. При ламинарном движении скорость изменяется по закону параболы и отношение средней скорости к максимальной (на оси трубы) $v_{cp}/v_{max}=0,5$. При турбулентном режиме это отношение равно коэффициенту поля скоростей C , который является функцией числа Рейнольдса:

$$v_{cp}/v_{max} = C = f(Re) \quad (19)$$

Измерив максимальное динамическое давление на оси трубы, подсчитывают максимальную скорость потока v_{max} .

Далее находят значение числа Рейнольдса:

$$Re = \frac{v_{max} D}{\nu} \quad (20)$$

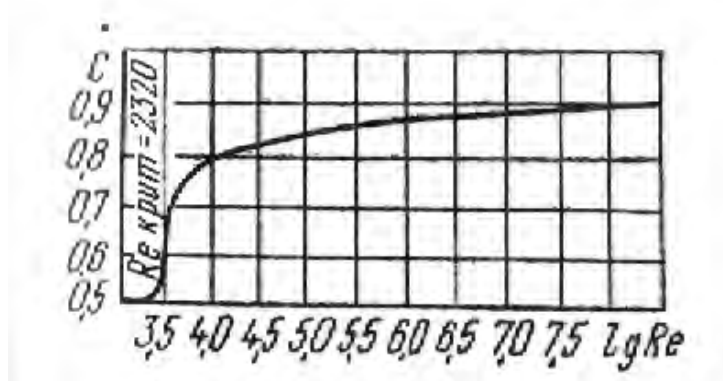
Значения кинематической вязкости ν для воздуха в зависимости от температуры приведены в табл. 2.

Таблица 2 – Значения кинематической вязкости ν для воздуха в зависимости от температуры

$t, ^\circ\text{C}$	0	10	20	30
$\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	13,26	14,23	15,15	16,09

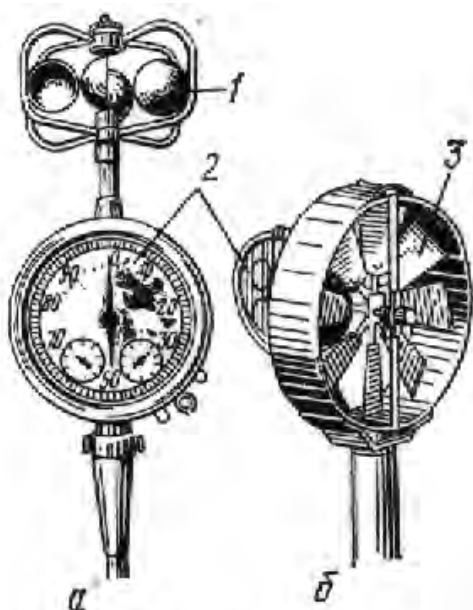
Пользуясь графиком зависимости $C=f(Re)$, изображенным на рис. 21, по значению $\lg Re$ находят коэффициент C , а затем и среднюю скорость потока в данном сечении

$$v_{cp} = C \cdot v_{max} \quad (21)$$



Р и с. 21. График зависимости $C=f(Re)$ при движении потока в трубе

При измерениях скоростей движения воздуха в приточных и вытяжных отверстиях воздуховодов, а также скоростей свободных потоков в помещениях пользуются анемометрами (рис. 22).



Р и с. 22. Анемометры:
 а – чашечный; б – крыльчатый;
 1 – полусферическая чашечка;
 2 – счетные механизмы;
 3 – крыльчатка

При скоростях от 1 до 20 м/с рекомендуется применять чашечные анемометры. Большую чувствительность имеют крыльчатые анемометры, но они менее прочны по конструкции и поэтому

предназначаются для измерения скоростей движения воздуха в пределах от 0,3 до 5 м/с.

Принципиальное устройство и работа анемометров обоих типов одинаковы. Под действием набегающего воздушного потока легкие полусферические чашечки или крыльчатка прибора приводятся во вращение, передаваемое посредством зубчатой передачи счетному механизму, стрелки которого показывают на шкалах циферблата путь (в метрах), проходимый воздухом за время работы прибора.

Записав начальное показание стрелок, устанавливают прибор в воздушный поток. При этом ось чашечного анемометра должна быть перпендикулярна, а крыльчатого – параллельна направлению потока, навстречу ему. Через 10...15 с, пока вертушка, вращаясь вхолостую, наберет устойчивые обороты, включают одновременно счетный механизм анемометра и секундомер. Для получения средней скорости потока воздуха у отверстия воздухопровода анемометр медленно и равномерно перемещают по всей площади этого отверстия. Через 1...2 мин, не убирая анемометр из потока, выключают одновременно секундомер и счетный механизм. Записывают конечное показание стрелок анемометра и секундомера.

Скорость воздуха (м/с) определяют по выражению:

$$v = k \frac{n_2 - n_1}{\tau}, \quad (22)$$

где n_1 и n_2 – соответственно начальное и конечное показания анемометра;

τ – время измерения, с;

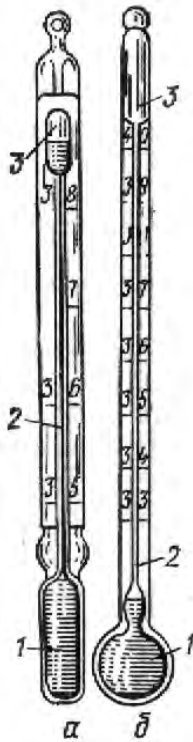
k – поправочный коэффициент, определяемый по тарировочному графику, прилагаемому к прибору.

При особо точных измерениях малых скоростей движения воздуха (0,05...5 м/с) используют термоанемометры, работа которых основана на охлаждении нагреваемого электрическим током датчика движущимся потоком воздуха. Датчиком в приборе служит термосопротивление в виде тонкой платиновой, нихромовой или вольфрамовой проволоки.

При определении подвижности воздуха в помещении трудно правильно установить анемометр навстречу потоку, да и чувствительность его может оказаться недостаточной. В этом случае, а

также для измерения скорости воздушного потока у отверстий воздуховодов используют *кататермометры* (рис. 23), представляющие собой спиртовые термометры с цилиндрическим или шаровым резервуаром, переходящим в капиллярную трубку.

Погрузив нижний резервуар прибора в стакан с горячей водой (75...80°C), выдерживают его до тех пор, пока спирт не заполнит примерно половину объема верхнего ампулообразного расширения капилляра. Затем кататермометр вытирают досуха салфеткой и подвешивают на штативе в месте исследования. По секундомеру определяют время охлаждения прибора с 38 до 35°C. Повторив измерения 3...4 раза, находят среднее значение времени охлаждения (τ , с).



Р и с. 23. Кататермометры:

- a* – цилиндрический;
- б* – шаровой;
- 1* – нижний резервуар;
- 2* – капиллярная трубка;
- 3* – верхний резервуар

После этого подсчитывают охлаждающую способность воздуха по кататермометру – катаиндекс H (Вт/см²), т.е. значение охлаждения с 1 см² поверхности резервуара (Вт) по формуле:

$$H = \frac{F}{\tau}, \quad (23)$$

где F – фактор кататермометра (постоянный коэффициент, обозначенный на тыльной стороне прибора или указанный в паспорте), Дж/см².

Далее определяют отношение H/θ , где θ – разность между средней температурой кататермометра ($36,5^{\circ}\text{C}$) и средней температурой воздуха в процессе I измерения ($^{\circ}\text{C}$). Затем по значению H/θ находят скорость движения воздуха в помещении из следующих формул:

при $H/\theta < 0,6$:

$$v = \left(\frac{H/\theta - 0,2}{0,4} \right)^2, \quad (24)$$

при $H/\theta \geq 0,6$:

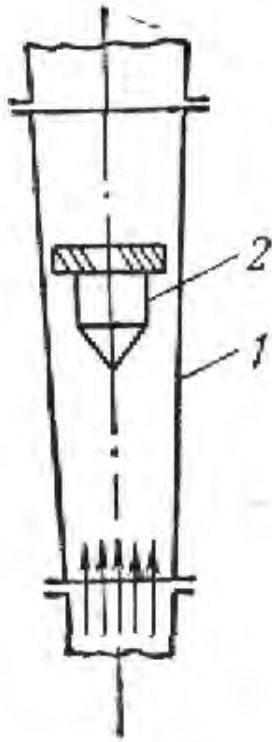
$$v = \left(\frac{H/\theta - 0,13}{0,47} \right)^2. \quad (25)$$

На основании зависимостей (25) и (26) составлена табл. 3.

Таблица 3 – Вычисление скорости движения воздуха по шаровому и цилиндрическому кататермометрам

H/θ	Скорость (м/с) по кататермометру		H/θ	Скорость (м/с) по кататермометру	
	цилиндрическому	шаровому		цилиндрическому	шаровому
0,30	0,063	0,011	0,46	0,423	0,30
0,32	0,090	0,035	0,48	0,490	0,36
0,34	0,122	0,062	0,50	0,563	0,44
0,36	0,160	0,090	0,52	0,640	0,52
0,38	0,203	0,120	0,54	0,723	0,62
0,40	0,250	0,160	0,56	0,810	0,73
0,42	0,303	0,200	0,58	0,903	0,88
0,44	0,360	0,250	0,60	1,000	1,00

Приборы для непосредственного измерения расхода вещества. Очень удобен для непосредственного измерения расхода газов или прозрачных жидкостей *ротаметр* (рис. 24), являющийся расходомером обтекания. Перепад давления в сохраняется постоянным, а приходное поперечное 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 прорезы для того, чтобы он, вращаясь под действием потока, центрировался в трубке прибора.



Р и с. 24. Схема ротаметра:

1 – стеклянная трубка;

2 – ротор

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*. Вращение крыльчатки или винтовой вертушки в них через редукторный механизм передается на счетчик прибора, показывающий расход жидкости ($\text{м}^3/\text{ч}$).

Крыльчатые расходомеры применяют для измерения малых расходов жидкостей (до $9,5 \text{ м}^3/\text{ч}$). Диаметр их условного прохода $d_y=15..50 \text{ мм}$. Винтовые расходомеры ($d_y>50 \text{ мм}$) используют при измерении больших расходов (до $200 \text{ м}^3/\text{ч}$).

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

В лабораторной практике и в производственных условиях широко применяют измерение расхода жидкости с помощью *мерных баков*, оборудованных указательными стеклами и шкалами, градуированными в единицах массы или объема, а также различных *весовых расходомеров*. По разности показаний в начале и конце периода измерения определяют расход вещества [1].

Лабораторная работа 5

ИЗМЕРЕНИЕ КОЛИЧЕСТВА ТЕПЛОТЫ

Цель работы – изучить конструктивные особенности и принцип действия приборов для измерения количества теплоты.

Задание:

- 1) Изучить конструктивные особенности и принцип действия приборов для измерения количества теплоты;
- 2) Сделать заключение о преимуществах и недостатках различных способов измерения количества теплоты.

Количество теплоты, подводимой в единицу времени в системы водяного отопления или к потребителям горячей воды, можно определить расчетным путем по данным раздельного измерения температуры воды в подающем (t_1) и обратном (t_2) трубопроводах тепловой сети и ее расхода при помощи самопишущих приборов.

Расход теплоты (Дж/ч) вычисляют по формуле:

$$Q = Q_m C_e (t_1 - t_2) = Q_v \rho C_e (t_1 - t_2), \quad (26)$$

где Q_m и Q_v – расход воды в подающем трубопроводе соответственно массовый (кг/ч) и объемный ($\text{м}^3/\text{ч}$);

C_e – удельная теплоемкость воды, Дж/(кг·°С);

ρ – плотность воды в подающем трубопроводе, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Удобнее и точнее определять расход теплоты при помощи тепломеров.

Для измерения расхода и количества теплоты (Дж) за некоторый промежуток времени $\tau = \tau_1 - \tau_2$ используют теплосчетчики, т.е. тепломеры, оборудованные счетчиками количества теплоты.

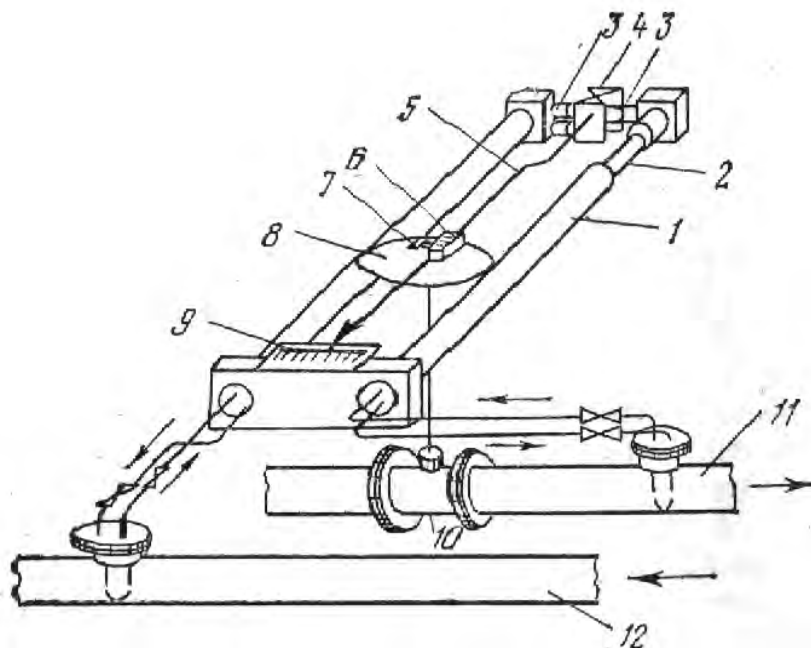
При помощи счетчика-тепломера определяют количество теплоты, численно равное интегралу:

$$Q = \int_{\tau_1}^{\tau_2} Q_m C_v (t_1 - t_2) d\tau \quad (27)$$

Теплосчетчики могут быть механические, электромеханические и электрические.

Механический теплосчетчик, схема которого изображена на рис. 25, представляет собой сочетание скоростного водомера с dilatометрическим дифференциальным термометром и интегрирующим механизмом.

Разность температур воды в трубопроводах тепловой сети измеряется следующим образом. Две пары латунных трубок 1 и 2, вставленных друг в друга, жестко соединены со стенкой прибора одной своей стороной. На свободных концах трубок закреплены ножи 3, упирающиеся в призму 4. Одна пара трубок омывается водой из подающего, другая из обратного трубопровода. Стрелка 5, соединенная с призмой, показывает по шкале 9 разность температур воды в трубопроводах. Диск 8 кинематически связан со скоростным водомером 10. Поэтому скорость вращения диска пропорциональна расходу воды. Укрепленный на стрелке счетчик 6 своим колесиком 7 касается вращающегося диска.

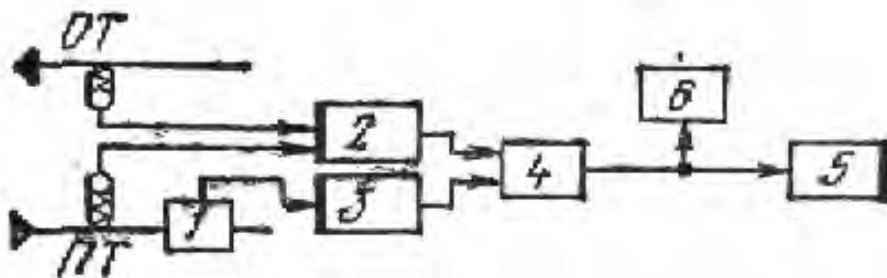


Р и с. 25. Схема механического теплосчетчика:

1, 2 – латунные трубки; 3 – ножи; 4 – призма; 5 – стрелка; 6 – счетчик; 7 – колесико; 8 – диск; 9 – шкала; 10 – скоростной водомер; 11 – подающий трубопровод; 12 – обратный трубопровод

Интегрирующий механизм работает так. Если температура воды в трубопроводах одинакова, колесико счетчика будет находиться в центре диска, а стрелка в нулевом положении. При наличии разности температур воды в трубопроводах стрелка переместит счетчик, и его колесико отойдет от центра диска. В случае изменения расхода соответственно будет изменяться и число оборотов приводного колесика счетного механизма. Следовательно, показания счетчика будут пропорциональны количеству теплоты, поступившей к потребителям из теплосети.

Упрощенная схема электромеханического и электрического теплосчетчиков показана на рис. 26. Здесь используются средства измерения с унифицированным входным и выходным сигналами постоянного тока (0...5мА). Разность температур воды в подающем и обратном трубопроводах тепловой сети измеряется термометрами сопротивления и измерительным преобразователем 3.



Р и с. 26. Схема электромеханического и электрического теплосчетчиков:

1 – расходомер (тахометрический или электромагнитный); 2 – измерительный блок; 3 – преобразователь; 4 – множительное преобразовательное устройство; 5 – миллиамперметр; 6 – интегрирующий механизм; ПТ и Т – прямой и обратный трубопроводы

Расход воды в подающем трубопроводе определяется при помощи тахометрического или электромагнитного расходомера 1 и измерительного блока 2. Сигналы от преобразователя 3 и измерительного блока 2 поступают на вход множительного преобразовательного устройства 4, выходной сигнал которого пропорционален расходу теплоты. Миллиамперметр 5 является вторичным прибором, показывающим расход теплоты (Дж/ч). Количество теплоты (Дж), поступившей к потребителю за некоторое время τ , измеряется интегрирующим механизмом 6. [1]

Лабораторная работа 6

ИЗУЧЕНИЕ КОНСТРУКЦИИ КОТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК

Цель работы – изучить конструктивные особенности и принцип действия современных котельных установок.

Задание:

- 1) Изучить конструктивные особенности и принцип действия котельных установок;
- 2) Изучить назначение и варианты исполнения различных устройств, входящих в состав котельной установки.
- 3) Составить принципиальную схему котельной установки.

Котлами называют устройства, предназначенные для получения пара или горячей воды повышенного давления за счет теплоты, выделяемой при сжигании топлива или подводимой от посторонних источников, например с горючими газами. Котлы делятся соответственно на паровые и водогрейные. Котлы, использующие теплоту, отходящих из печей газов или других основных и побочных продуктов различных технологических процессов, называют котлами-утилизаторами.

Для стабильной и безопасной работы котла его снабжают вспомогательным оборудованием, служащим для подготовки и подачи топлива, воздуха, очистки и подачи воды, отвода продуктов сгорания и их очистки от золы и токсичных примесей, удаления золошлаковых остатков.

Котельной установкой называют комплекс устройств, включающий в себя собственно котел и вспомогательное оборудование.

Котельные установки, снабжающие паром турбины тепловых электрических станций, называют энергетическими. Для снабжения паром производственных потребителей и отопления зданий в ряде случаев создают специальные производственные и отопительные котельные установки.

В качестве источников теплоты для котельных установок используются природные и искусственные топлива, отходящие газы промышленных печей и других устройств, солнечная энергия, энергия деления ядер тяжелых элементов и т.д.

Устройство современного парового котла.

На рис. 27 приведена одна из схем современного котла с естественной циркуляцией.

Барабанный паровой котел состоит из топочной камеры и газоходов, барабана, поверхностей нагрева, находящихся под давлением рабочей среды (воды, пароводяной смеси, пара), воздухоподогревателя, соединительных трубопроводов и воздуховодов.

К горелкам подается топливо (рис. 27), а также подводится воздух, предварительно нагретый уходящими из котла газами в воздухоподогревателе 5.

Топливоздушная смесь, подаваемая горелками в топку 8 парового котла, сгорает, образуя высокотемпературный (примерно 1500°C) факел, излучающий теплоту на трубы 1, расположенные на внутренней поверхности стен топки, которые являются испарительными поверхностями нагрева и называются экранами.

Отдав часть теплоты экранам, топочные газы с температурой около 1000°C проходят через верхнюю часть заднего экрана, трубы которого здесь разведены в два-три ряда, и омывают пароперегреватель 3.

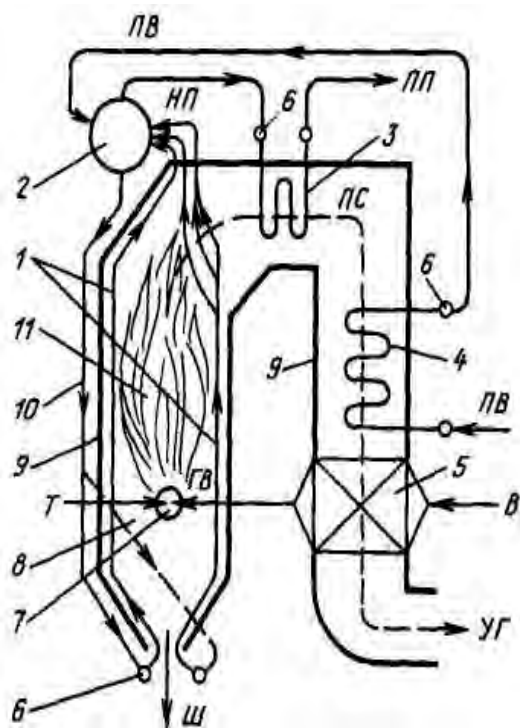
Затем продукты сгорания движутся через водяной экономайзер, воздухоподогреватель и покидают котел с температурой около $110\text{--}150^{\circ}\text{C}$.

Вода, которая поступает в паровой котел, называется питательной. Забирая теплоту от продуктов сгорания (уходящих газов), она подогревается в водяном экономайзере 4, за счет чего экономит теплоту сожженного топлива.

Испарение воды происходит в экранных трубах 1. Испарительные поверхности подключены к барабану 2 и вместе с опускающимися трубами 10, соединяющими барабан с нижними коллекторами экранов, образуют циркуляционный контур.

В барабане происходит разделение пара и воды, а большой запас воды в нем повышает надежность работы котла.

Сухой насыщенный пар из барабана поступает в пароперегреватель 3, перегретый пар направляется к потребителю.



Р и с. 27. Современный вертикально-водотрубный барабанный паровой котел с естественной циркуляцией:

- ПВ* – подача питательной воды;
- НП* – линия насыщенного пара;
- ПП* – отвод перегретого пара;
- ГВ* – подача топлива к горелке;
- В* – подвод воздуха к воздухоподогревателю;
- ГВ* – горячий воздух;
- ПС-УГ* – тракт продуктов сгорания топлива и уходящих (из котла) газов;
- Ш* – шлак; *1* – экранные трубы;
- 2* – барабан; *3* – пароперегреватель;
- 4* – водяной экономайзер;
- 5* – воздухоподогреватель;
- 6* – коллекторы; *7* – горелка; *8* – топка;
- 9* – контур (стена) топки и газоходов;
- 10* – опускная труба; *11* – излучающий теплоту топочный факел

Все поверхности нагрева котла, включая воздухоподогреватель, как правило, трубчатые. Лишь некоторые мощные паровые котлы имеют воздухоподогреватели иной конструкции.

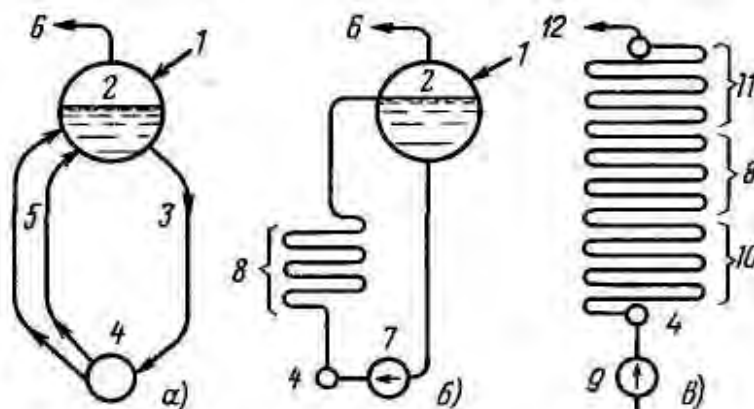
Нижняя трапецевидная часть топки котельного агрегата называется холодной воронкой – в ней охлаждается выпадающий из факела частично спекшийся зольный остаток, который в виде шлака проваливается в специальное приемное устройство. Газомазутные котлы не имеют холодной воронки.

Газоход с элементами *4* и *5* называют конвективным (конвективная шахта), в нем теплота за счет расположенных внутри его водяного экономайзера и воздухоподогревателя передается воде и воздуху в основном конвекцией. Называемые хвостовыми поверхности нагрева, встроенные в этот газоход, позволяют снизить температуру продуктов сгорания от 500–700°С после пароперегревателя почти до 100°С, т.е. полнее использовать теплоту сжигаемого топлива.

Всю трубную систему и барабан котла поддерживает каркас из колонн и поперечных балок. Топка и газоходы защищены от наружных теплопотерь обмуровкой – слоем огнеупорных и изоляционных материалов. С наружной стороны обмуровки стенки котла имеют газоплотную обшивку стальным листом для предотвращения присосов в топку избыточного воздуха и выхода наружу запыленных горячих продуктов сгорания.

Для повышения надежности работы котла в ряде случаев (котлы с многократной принудительной циркуляцией) движение воды и пароводяной смеси в циркуляционном контуре осуществляется принудительно (насосом). Одними из последних являются конструкции прямоточных котлов с принудительным – при помощи питательного насоса – движением воды, пароводяной смеси и перегретого пара. Для этих агрегатов отпадает необходимость в барабане, и он не устанавливается. По прямоточной схеме работают также практически все водогрейные котлы, не имеющие ни испарительных, ни перегревающих поверхностей.

Основные схемы движения потока вода – пароводяная смесь – пар в современных котельных агрегатах показаны на рис. 28.



Р и с. 28. Схемы движения воды, пароводяной смеси и пара в котельном агрегате:

a – естественная циркуляция; *б* – многократно-принудительная циркуляция;
в – прямоточное движение:

1 – подвод питательной воды; *2* – барабан; *3* – необогреваемые опускные трубы;
4 – нижний коллектор; *5* – обогреваемые подъемные трубы; *6* – отвод насыщенного пара;
7 – циркуляционный насос; *8* – испарительная поверхность; *9* – питательный насос;
10 – экономайзерная часть поверхности нагрева; *11* – пароперегревательная часть поверхности нагрева; *12* – отвод перегретого пара

За счет тяги специально устанавливаемого дымососа в газоходах и топке котла поддерживается разрежение. Паровые котлы оснащаются системами дистанционного управления и автоматизации, обеспечивающими надежную, безопасную и экономичную их работу [2].

Поверхности нагрева котла.

Испарительные поверхности. Парогенерирующие поверхности нагрева, как правило, располагаются в основном в топочной

камере и воспринимают теплоту излучения. Это – экранные трубы, а также устанавливаемый на выходе из топки небольших котлов конвективный пучок труб.

Экраны котлов с естественной циркуляцией, работающих под разрежением в топке, выполняются из гладких труб с внутренним диаметром 40–80 мм. Экраны представляют собой ряд параллельно включенных вертикальных подъемных труб, соединенных между собой коллекторами. Зазор между трубами обычно составляет 4–6 мм. Размеры топки и величину поверхности экранов рассчитывают таким образом, чтобы на выходе из топки температура продуктов сгорания не превышала температуру размягчения золы, иначе зола будет прилипать к деталям котла, расположенным за топкой, и забьет («зашлакует») путь для прохода газа.

Пароперегреватели. Пароперегреватель устанавливается для повышения температуры пара, поступающего из испарительной системы котла (получения перегретого пара). Его трубы, которые изготавливаются диаметром 22–54 мм могут располагаться на стенах или потолке топки и воспринимать теплоту излучением либо в основном конвекцией.

Температура перегретого пара должна поддерживаться постоянной всегда. Это достигается с помощью регулирующих устройств – пароохладителей. Наиболее широко распространены пароохладители впрыскивающего типа. Регулирование в них производится путем впрыскивания обессоленной воды (конденсата) в поток пара. Вода при испарении отнимает часть теплоты у пара и снижает его температуру.

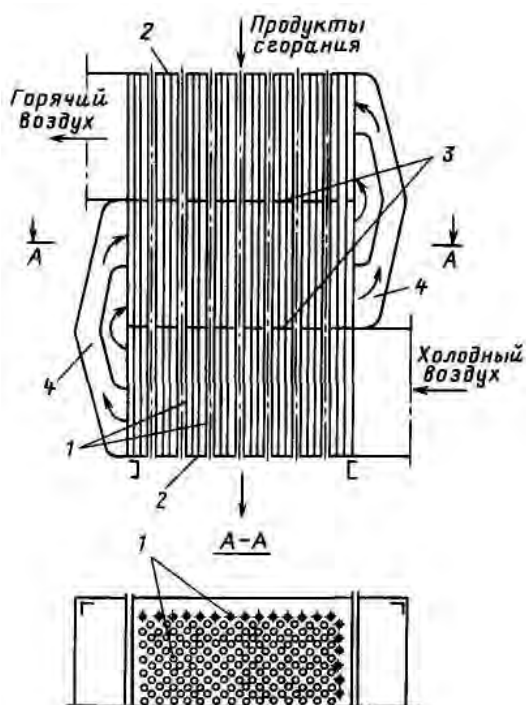
Низкотемпературные поверхности нагрева. Низкотемпературными называются поверхности, расположенные в конвективном газоходе и работающие при относительно невысоких температурах продуктов сгорания – водяные экономайзеры и воздухоподогреватели. Они устанавливаются с целью максимального использования теплоты уходящих из котла газов.

Водяные экономайзеры предназначены для подогрева питательной воды. Обычно их выполняют из стальных труб диаметром 28–38 мм, согнутых в вертикальные змеевики и скомпонованных в пакеты. В пакетах трубы располагаются в шахматном порядке довольно плотно: расстояние между осями соседних труб поперек потока дымовых газов составляют 2–2,5 диаметра трубы, а между рядами вдоль потока – 1–1,5.

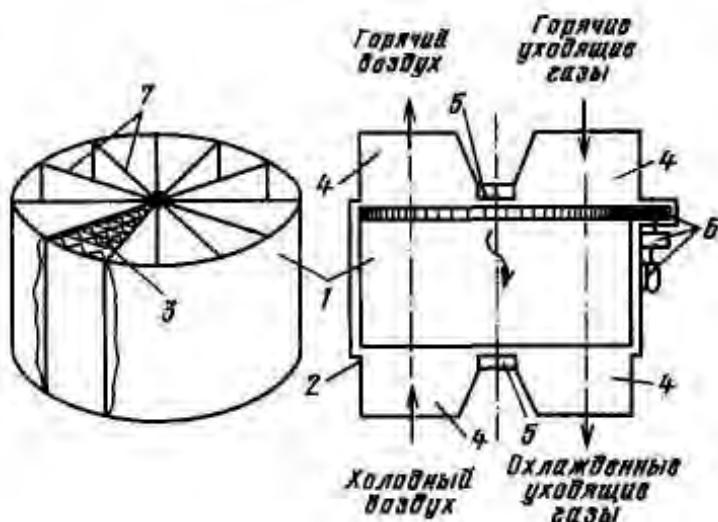
Скорость движения воды в экономайзере должна быть не ниже 0,5–1 м/с. Эти скорости обусловлены необходимостью смывания со стенок труб пузырьков воздуха, способствующих коррозии, и предотвращения расслоения пароводяной смеси, которое может привести к перегреву слабо охлаждаемой паром верхней стенки трубы и ее разрыву. Кроме того движение воды в экономайзере обязательно должно быть восходящее, чтобы имеющийся в трубах после монтажа или ремонта воздух легко вытеснялся водой.

Воздухоподогреватели. С целью более полного использования теплоты уходящих газов после экономайзера ставят воздухоподогреватель, в котором нагревают воздух, забираемый из атмосферы и идущий затем в топку на горение. При сжигании влажного угля нагретый воздух может предварительно использоваться для его сушки в углеразмольном устройстве и транспортировки полученной пыли в горелку. Принципу действия воздухоподогревателя разделяются на рекуперативные и регенеративные.

Рекуперативные – это, как правило, стальные трубчатые воздухоподогреватели с диаметром трубок 30–40 мм (см. рис. 29). Температуру стенок труб воздухоподогревателя во избежание конденсации на них водяных паров из уходящих газов желательно поддерживать выше точки росы. Это достигается предварительным подогревом воздуха в паровом калорифере либо рециркуляцией части горячего воздуха.



Р и с. 29. Рекуперативный трубчатый трехходовой воздухоподогреватель:
 1 – трубки; 2 – трубные доски;
 3 – перегородка;
 4 – перепускные короба



Р и с. 30. Устройство регенеративного вращающегося воздухоподогревателя:

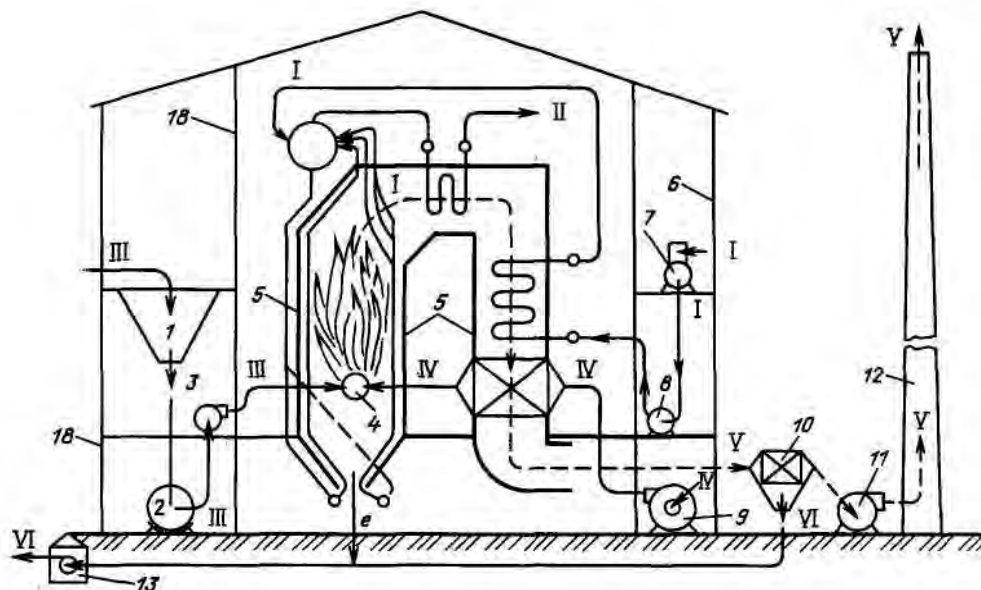
1 – ротор; 2 – неподвижный корпус; 3 – набивка; 4 – коробка подвода и отвода воздуха и газа; 5 – секторные плиты, разделяющие газовый и воздушный потоки; 6 – механизм привода (электродвигатель, редуктор, шестерня);

7 – сплошные перегородки ротора, препятствующие перемещению воздуха и продуктов сгорания

Регенеративный воздухоподогреватель котла (рис. 30) имеет вид медленно вращающегося ротора с сердцевинной из гофрированных тонких стальных листов, заключенный в неподвижный корпус. Корпус разделен на две части – воздушную и газовую, таким образом, при вращении ротора сердцевина попеременно пересекает то газовый, то воздушный поток, при этом движение газов и воздуха – противоточное [2].

Технологическая схема котельной установки.

В качестве примера на рис. 31 приведена схема котельной установки, работающей на пылевидном угле.



Р и с. 31. Технологическая схема котельной установки, работающей на твердом топливе:

I – водяной тракт; II – перегретый пар; III – топливный тракт; IV – путь движения воздуха; V – тракт

Топливо с угольного склада после дробления подается конвейером в бункер сырого угля *1*, из которого далее направляется в систему пылеприготовления, включающую в себя углеразмольную мельницу *2*. Затем уже пылевидное топливо транспортируется по трубам воздухом, нагнетаемым вентилятором *3*, к горелкам *4* топки котла *5*, находящегося в котельной *6*. Для полного сжигания топлива к горелкам подводится также дополнительный – вторичный воздух, который подается дутьевым вентилятором *9* через воздухоподогреватель котла. Вода для питания котла из бака питательной воды *7*, имеющего деаэрационное устройство, нагнетается питательным насосом *8*.

Уходящие из котла газы очищаются от золы в золоулавливающем устройстве *10* и с помощью дымососа *11* выбрасываются в атмосферу через дымовую трубу *12*. Пылевидная зола, уловленная из дымовых газов, и выпавший в нижнюю часть топки шлак удаляются, как правило, в потоке воды по каналам, а затем образующаяся пульпа откачивается специальными багерными насосами *13* и удаляется по трубопроводам. В последнее время, однако, в связи с тем, что зола может использоваться для нужд строительства, интенсивно внедряется транспортировка золы в сухом виде с помощью воздушного потока. Устройства, обеспечивающие нормальную работу котла, но не являющиеся его составными частями, относятся к вспомогательному оборудованию котельной установки [2, 3, 4].

СПИСОК литературных источников

1. Захаров, А.А. Практикум по применению теплоты в сельском хозяйстве. 2-е изд., перераб. и доп.– М.: Агропромиздат, 1985.– 175 с.
2. Теплотехника / А.П. Баскаков, Б.В. Берг, О.К. Витт и др.; под. ред. А.П. Баскакова.– 2-е изд., перераб.– М.: Энергоатомиздат, 1991.– 224 с.
3. Соколов, Б.А. Котельные установки и их эксплуатация : учебник для начального профессионального образования / Б.А. Соколов.– Изд. 2-е, испр.– М.: Академия.– 2007.– 432 с.
4. Липов, Ю.М. Котельные установки и парогенераторы / Ю.М. Липов, Ю.М. Третьяков.– М. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика».– 2003.– 592 с.

Содержание

Введение	3
Лабораторная работа 1	
Измерение давления.....	3
Лабораторная работа 2	
Измерение температуры.....	9
Лабораторная работа 3	
Измерение влажности воздуха.....	17
Лабораторная работа 4	
Измерение расхода и скорости движения вещества	21
Лабораторная работа 5	
Измерение количества теплоты.....	33
Лабораторная работа 6	
Изучение конструкции котельных установок.....	36
Список литературных источников.....	44

Заказ № 248–Р. Тираж 50 экз. Подписано в печать 21.11.2022 г.
Вологодская ГМХА 160555, г. Вологда, с. Молочное, ул. Емельянова, 1