

Государственное бюджетное  
профессиональное образовательное учреждение  
«Кунгурский сельскохозяйственный колледж»

**Методические указания**  
**по выполнению практических работ**  
**ОП.01.02 АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**  
**МЕЖДИСЦИПЛИНАРНОГО МОДУЛЯ МДМ.01 ХРАНЕНИЕ И**  
**ПЕРЕРАБОТКА ЗЕРНА И СЕМЯН НА АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ**  
**ЛИНИЯХ**  
по специальности 19.02.11 Технология продуктов питания из  
растительного сырья.

## **ВВЕДЕНИЕ**

Настоящие рекомендации по выполнению практических работ содержат тематику, задания и методические рекомендации по самостоятельной подготовке студента к выполнению практических работ, закреплению пройденного материала и проверки знаний.

Ведущей дидактической целью предлагаемых практических занятий является закрепление теоретических знаний по дисциплине, формирование практических умений, способствующих формированию общих и профессиональных компетенций, необходимых в последующей профессиональной деятельности.

Рекомендации содержат тематическое наименование практических работ, согласно тематическому плану учебной программы теоретического курса. Для каждого практического занятия изложены цель и задачи работы, порядок выполнения и форма отчетности. В конце каждой темы имеются контрольные вопросы для закрепления полученных знаний и навыков.

В конце сборника указан библиографический список рекомендуемой литературы.

## **ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ ПРАКТИЧЕСКИХ РАБОТ**

Практические работы выполняются в после изучения теоретического материала соответствующих тем.

Перед началом выполнения задания внимательно прочитайте данное пособие, чтобы понять суть работы.

Выполнение каждой практической работы состоит из следующих этапов:

- самостоятельная подготовка студентов;
- выполнение практической работы;

## **ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ПРАКТИЧЕСКИХ РАБОТ И СДАЧИ ОТЧЕТА**

Расчеты задач ведутся в тетради;

Вычисления ведутся с точностью до первого десятичного знака с соблюдением правил округления цифр;

Размерность проставляется в системе СИ;

Все формулы должны нумероваться в пределах каждого раздела;

Применяемые формулы необходимо сопровождать расшифровкой условных обозначений.

## **СИСТЕМА ОЦЕНИВАНИЯ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ**

Практическое занятие - это одна из форм учебной работы, которая ориентирована на закрепление изученного теоретического материала, его более глубокое усвоение и формирование умения применять теоретические знания в практических, прикладных целях. Особое внимание на практических занятиях уделяется выработке учебных или профессиональных навыков. Такие навыки формируются в процессе выполнения

конкретных заданий — упражнений, задач и т. п. — под руководством и контролем преподавателя.

На "5" оценивается работа, если обучающийся имеет системные полные знания и умения по поставленному вопросу. Содержание вопроса учащийся излагает связно, в краткой форме, раскрывает последовательно изученный материал, демонстрируя прочность и прикладную направленность полученных знаний и умений, не допускает терминологических ошибок и фактических неточностей.

На "4" оценивается работа, в которой отсутствуют незначительные элементы содержания или присутствуют все необходимые элементы содержания, но допущены некоторые ошибки, иногда нарушалась последовательность изложения.

На "3" оценивается работа, в которой отсутствуют значительные элементы содержания или присутствуют все вышеизложенные знания, но допущены существенные ошибки, нелогично, пространно изложено основное содержание вопроса.

На "2" оценивается работа, в которой обучающиеся демонстрируют отрывочные, бессистемные знания, неумение выделить главное, существенное в ответе, допускают грубые ошибки.

### **Практическое занятие 1. Изучение конструкции и принципа действия термометров сопротивления и вторичных приборов к ним**

*Цель.* Изучение конструкции и принципа действия термометров сопротивления, а также вторичных приборов к ним – автоматических мостов и логометров, приобретение практических навыков работы с автоматическими электронными мостами и логометрами, исследование двухпроводной и трехпроводной схемы подключения термометров сопротивления ко вторичным измерительным приборам.

#### **2.1 Теоретические сведения**

Температура является одним из важнейших параметров, характеризующих большинство производственных процессов пищевой промышленности. Многообразие современных измерительных преобразователей – термометров, выпускаемых промышленностью, позволяет измерять температуру практически во всем диапазоне изменения технологических процессов всех отраслей пищевой промышленности.

Измерение температуры термометрами сопротивления основано на свойстве проводников и полупроводников изменять свое электрическое сопротивление при изменении температуры.

Для изготовления чувствительных элементов серийных термометров сопротивления применяют чистые металлы. К металлам предъявляют следующие основные требования:

- металл не должен окисляться и вступать в химическое взаимодействие с измеряемой средой, должен обладать высокой воспроизводимостью значений электрического сопротивления в интервале рабочих температур;
- температурный коэффициент электрического сопротивления металла должен быть достаточно большим и неизменным;
- сопротивление должно изменяться с изменением температуры по прямой или плавной кривой без резких отклонений и явлений гистерезиса;

- удельное электрическое сопротивление металла должно быть достаточно большим: чем больше удельное сопротивление, тем меньше нужно металла для получения требуемого первоначального сопротивления термометра;

Указанным требованиям в определенных температурных пределах наиболее полно отвечает медь и платина.

Чувствительный элемент платинового термометра сопротивления представляет собой спираль из тонкой платиновой проволоки диаметром 0,005 мм., помещенной в капиллярных гармонических трубках, заполненных порошком. Это чувствительный элемент помещают в специальную защитную арматуру из латуни, меди, стали.

Чувствительный элемент медного термометра сопротивления выполнен в виде без индукционной обмотки из медной проволоки 0,01 мм.

Технические термометры сопротивления как платиновые – ТСП, так и медные – ТСМ, выпускаются взаимозаменяемыми, то есть стандартными градуировками. Они имеют строго определенное значение сопротивления при 0 °С.

Чтобы знать действительное значение измеренной температуры, необходимо измерить сопротивление чувствительного элемента термометра сопротивления. Для этой цели используются вторичные измерительные приборы: уравновешенные мосты и логометры.

#### 2.1.1 Компенсационный метод измерения сопротивления термометра

Измерение температуры может осуществляться различными методами. Каждый метод имеет свои особенности, определяемые как принципом, так и применяемыми средствами и схемами их подключения. Кроме того, при измерении температуры следует учитывать взаимодействие между термопреобразователями и измеряемой средой.

Компенсационный метод измерения сопротивления широко применяется при точных измерениях температуры лабораторными термометрами сопротивления, а также при их градуировке. Применяемые в этом случае термометры сопротивления должны иметь четыре выходных проводника. Два из них обычно называют токовыми, а два других — потенциальными. При применении таких термометров рассматриваемый метод измерения сопротивления позволяет полностью исключить влияние сопротивления соединительных проводников на результаты измерений, так как измерения производятся без потребления тока. Компенсационный метод измерения сопротивлений используется также для измерения сопротивления пирометрических милливольтметров и в ряде других случаев.

Схема измерения сопротивлений компенсационным методом показана на рисунке 1.

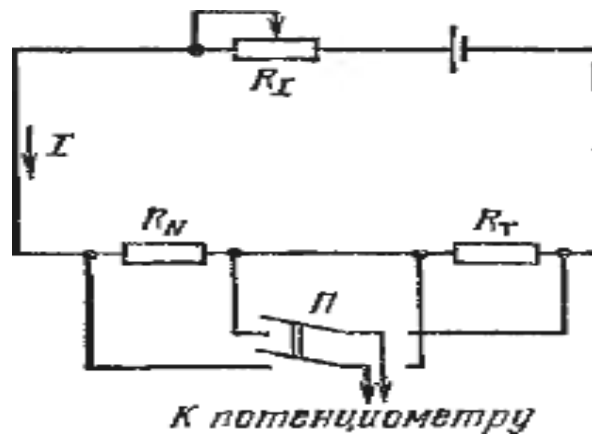


Рисунок 1 - Схема измерения сопротивления компенсационным методом

Как видно из приведенной схемы, термометр сопротивления  $R_T$ , включен последовательно с образцовым резистором  $R_N$  в цепь источника постоянного тока. В качестве резистора  $R_N$ , обычно применяют образцовую катушку сопротивления класса 0,01. При использовании лабораторного термометра сопротивления второго разряда можно применять образцовую катушку сопротивления класса 0,02. В некоторых случаях, например при измерении сопротивления пирометрического милливольтметра, в качестве образцового резистора  $R_N$  и пользуются магазином сопротивления соответствующего класса точности. Измерительный ток в схеме устанавливается с помощью реостата  $R_I$ , а контролируется по падению напряжения на образцовом резисторе  $R_N$  посредством лабораторного потенциометра. Необходимое значение измерительного тока должно выбираться таким, чтобы при измерении температуры не вызывать заметного нагрева чувствительного элемента термометра сопротивлением выделяющимся джоулевым теплом.

Потенциальные проводники от термометра сопротивления и образцовой катушки присоединены к переключателю  $\Pi$ , с помощью которого лабораторный потенциометр может быть поочередно подключен для измерения падения напряжения на образцовой катушке сопротивления  $U_N$  и на чувствительном элементе термометра  $U_T$ . Если через  $I$  обозначить силу тока в цепи, то:

$$U_N = I \cdot R_N, U_T = I \cdot R_T \quad (2.1)$$

Откуда,

$$R_T = \frac{U_T}{U_N} R_N \quad (2.2)$$

Измерительный ток, проходящий через лабораторный термометр сопротивления, имеет значение около 2 мА, а  $U_T$  и  $U_N$  не превышают нескольких десятков милливольт. Поэтому для измерения  $U_T$  и  $U_N$  применяют низкоомные лабораторные потенциометры класса 0,01 и 0,02.

Точность измерения сопротивления термометра, а вместе с тем и температуры компенсационным методом, зависит от точности применяемых технических средств и условий измерения.

### 2.1.2 Измерение сопротивления термометра мостом

Сопротивление термометра с помощью моста можно измерить нулевым методом или методом отклонения. Ниже рассмотрим эти методы измерения сопротивления термометра.

#### - Измерение сопротивления термометра уравновешенным мостом

Уравновешенные четырехплечие мосты являются наиболее распространенными приборами для измерения сопротивления термометра нулевым методом, как при градуировке термометра, так и при измерениях температуры в лабораторных условиях. Вообще же уравновешенные мосты находят широкое применение в лабораторных условиях для измерения сопротивлений от 0,5 до  $10^7$  Ом. Для измерения малых сопротивлений применяют двойные мосты или компенсационный метод измерения.

Принципиальная схема уравновешенного моста с включенным термометром сопротивления  $R_T$  изображена на рисунке 2, где  $R_1$ ,  $R_2$  и  $R_3$  — резисторы с известными сопротивлениями. Один из них, например  $R_1$  является сравнительным регулируемым плечом, и одну из диагоналей моста (точки  $b$  и  $d$ ) включен источник питания. Во вторую (точки  $a$  и  $c$ ) — чувствительный нулевой гальванометр.

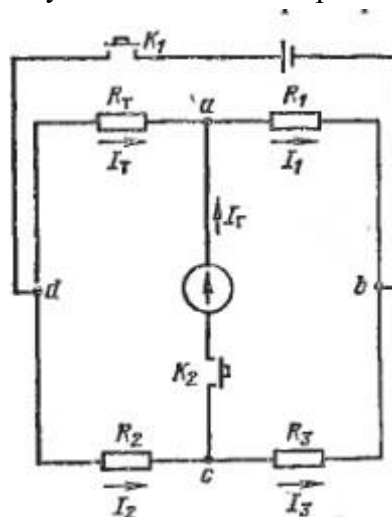


Рисунок 2 - Принципиальная схема уравновешенного моста

Изменяя значение сопротивления сравнительного плеча, всегда можно добиться такого состояния схемы, при котором потенциалы точек  $a$  и  $c$ , а следовательно, и ток в нулевом приборе, равны нулю. Такое состояние обычно называют состоянием равновесия схемы. Равновесие схемы может быть достигнуто только при определенном соотношении между сопротивлениями плеч моста. Действительно, если мост уравновешен, т. е.  $I_G = 0$ , то  $I_T = I_1$ , и  $I_2 = I_3$  и падения напряжений на  $R_T$  и  $R_2$ , а также и на  $R_1$  и  $R_3$  будут равны:

$$\begin{aligned} I_G \cdot R_G &= I_1 \cdot R_1, \\ I_2 \cdot R_2 &= I_3 \cdot R_3 \end{aligned} \quad (2.3)$$

Отсюда получаем следующее соотношение:

$$R_T = \frac{R_2}{R_3} R_1. \quad (2.4)$$

Из уравнения (2.4) видно, что уравновесить мост можно подбором сопротивления резистора  $R_T$  при постоянном отношении балансных плеч  $\frac{R_2}{R_3}$ . Следовательно, каждому значению сопротивления термометра соответствует вполне определенное значение сопротивления сравнительного плеча  $R_1$  при постоянно выбранном отношении плеч  $\frac{R_2}{R_3}$ .

При измерении сопротивления  $R_T$  работа на мосте сводится к следующему. Если значение измеряемого сопротивления неизвестно, то, задавшись отношением балансных плеч моста  $\frac{R_2}{R_3}$  равным единице, вводят на сравнительном плече  $R_T$  наименьшее сопротивление и, замкнув на мгновение кнопки  $K_1$  и  $K_2$ , замечают, в какую сторону отклоняется стрелка нулевого гальванометра. Затем на сравнительном плече вводят наибольшее сопротивление, вновь на короткий период замыкают кнопки и замечают сторону отклонения. Если это отклонение противоположно первому, то остается только подобрать такое  $R_T$ , при котором повторные замыкания и размыкания кнопок не вызовут колебаний стрелки нулевого гальванометра. Если же отклонения происходят в одну и ту же сторону, то надо изменить взятое ранее отношение балансных плеч и повторить опыт.

После того как измеряемое сопротивление приблизительно определено, подбирают такое значение отношения балансных плеч моста, которое гарантировало бы его максимальную чувствительность, и вновь производят измерение.

Определение температуры по измеренному сопротивлению термометра без учета сопротивлений соединительных проводов может сопровождаться значительной дополнительной погрешностью.

#### *- Измерение сопротивления термометра неуравновешенным мостом*

Неуравновешенные мосты, применяемые для технических измерений температуры с помощью термометра сопротивления, имеют то преимущество перед уравновешенными мостами, что позволяют получать отсчеты показаний по шкале прибора без уравновешивания моста. Неуравновешенные мостовые измерительные схемы используются в измерительных преобразователях для преобразования сопротивления термометра в напряжение, а также для других целей, рассматриваемых ниже.

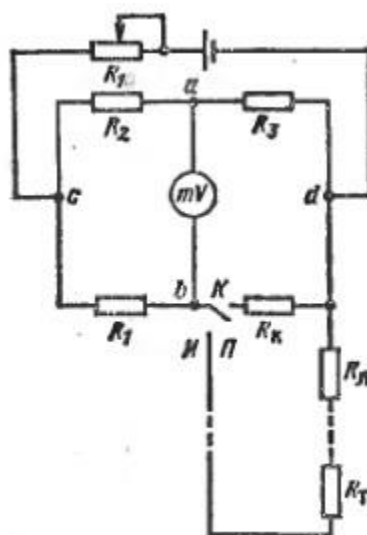
На рисунке 3 показана принципиальная схема неуравновешенного моста. Переключатель  $\Pi$  позволяет включать либо термометр сопротивления (положение И), либо контрольный резистор (положение К). Если при положении И переключателя  $\Pi$  сопротивление термометра изменится, то через милливольтметр, включенный в измерительную диагональ моста, потечет ток и указатель его отклонится. Угол отклонения указателя милливольтметра, а следовательно, и сила тока будут тем больше, чем значительнее нарушено равновесие моста. Таким образом, устанавливается известная зависимость между отклонением указателя милливольтметра и сопротивлением

термометра, позволяющая судить о температуре термометра, а следовательно, и о температуре среды, в которой он находится.

Сила тока, протекающего через милливольтметр, выражается следующим уравнением:

$$I_M = U_{cd} \frac{R_1 \cdot R_3 - R_2 \cdot R_T}{\ddot{A}}, \quad (2.5)$$

$$\text{где } \ddot{A} = R_i (R_1 + R_2) (R_2 + R_3) + R_2 R_3 (R_1 + R_2) + R_1 R_3 (R_2 + R_3)$$



$R_1, R_2$  и  $R_3$  - постоянные резисторы плеч моста;  $R_T$  - сопротивление термометра;  
 $mV$  - милливольтметр с внутренним сопротивлением  $R_M$ ;  $R_K$  - контрольный резистор;  
 $\Pi$  - переключатель

Рисунок 3 - Принципиальная схема неуравновешенного моста

Из этого выражения (2.5) видно, что ток, протекающий через милливольтметр, пропорционален напряжению  $U_{cd}$  на вершинах моста  $a$  и  $b$ . Вследствие этого для обеспечения правильности показаний прибора необходимо применять стабилизированный источник питания или поддерживать постоянное напряжение в точках  $c$  и  $d$ ; для этой цели служит регулировочный резистор  $R_1$ , выполненный в виде реостата. Для обеспечения контроля напряжения предусматривается постоянный, не зависящий от температуры контрольный резистор  $R_K$ , включаемый в схему моста вместо термометра сопротивления с помощью переключателя  $\Pi$ . Резистор  $R_K$  обычно имеет сопротивление, равное сопротивлению термометра, соответствующему двум третям шкалы прибора и соединительных проводов. При включении  $R_K$  указатель милливольтметра должен встать на контрольную отметку. Если напряжение  $U_{cd}$  мало, то указатель прибора не дойдет до контрольной отметки, а если велико, то указатель ее перейдет. Для установления надлежащего значения  $U_{cd}$  как упоминалось выше, пользуются реостатом  $R_1$ .

В настоящее время для питания неуравновешенных мостовых измерительных схем применяют стабилизированные источники питания (ИПС). Для уменьшения погрешности

вследствие изменения с температурой сопротивления проводов, соединяющих термометр с мостом, применяют трехпроводную схему включения термометра в мост, показанную на рисунке 4. Здесь  $R_L$  - манганиновые катушки для подгонки сопротивления линии до заданного значения. Остальные обозначения соответствуют принятым выше. В этой схеме переключатель  $\Pi$  и резистор  $R_K$  служат для контроля исправности моста.

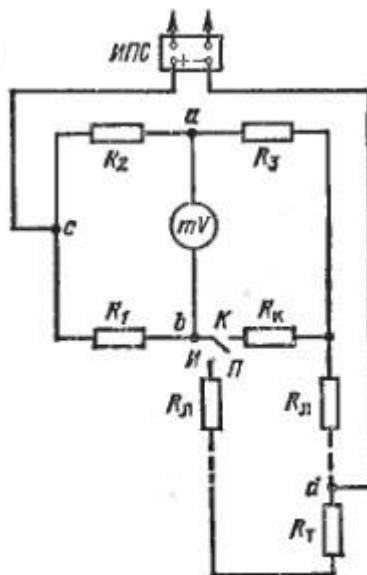


Рисунок 4 - Принципиальная схема неуравновешенного моста с термометром, включенным по трехпроводной схеме

### 2.1.3 Измерение температуры тел по их тепловому излучению

Методы измерения температуры тел по их тепловому излучению называют часто методами пирометрии излучения. Средства измерений температуры тел по тепловому излучению принято называть пирометрами излучения или просто пирометрами. Они широко применяются в металлургической и в других отраслях промышленности, а также при проведении научных исследований для измерения температур тел от 300 до 6000 °С и выше. Вообще же пирометры могут быть использованы для измерения и более низких температур.

При измерении температуры с помощью пирометров температурное поле объекта измерения не искажается, так как измерение, осуществляемое методами пирометрии излучения, не требует непосредственного соприкосновения с телом какого-либо термоприемника. Поэтому такие методы измерения температур тел принято называть бесконтактными.

Бесконтактные методы измерения температур теоретически не имеют верхнего температурного предела своего применения. Температура источника излучения со сплошным спектром, близкая к 6000 °С, измеряется теми же методами, что и температура в 1000 или 2000 °С. Различие может быть лишь только в технике измерений.

В тех случаях, когда для длительного измерения температур объектов могут применяться наряду с пирометрами излучения приборы, использующие контактные методы (термоприемники погружения), последним следует отдать предпочтение, так как

они обычно обеспечивают более высокую точность измерения температуры по сравнению с пирометрами излучения.

Методы измерения температур, использующие различные свойства теплового излучения тел, вытекающие из законов излучения абсолютно черного тела, нашли широкое практическое применение. Под абсолютно черным телом понимают тело, которое поглощает всю падающую на него лучистую энергию. Такие тела в природе отсутствуют, но модель черного тела можно осуществить с достаточной степенью приближения.

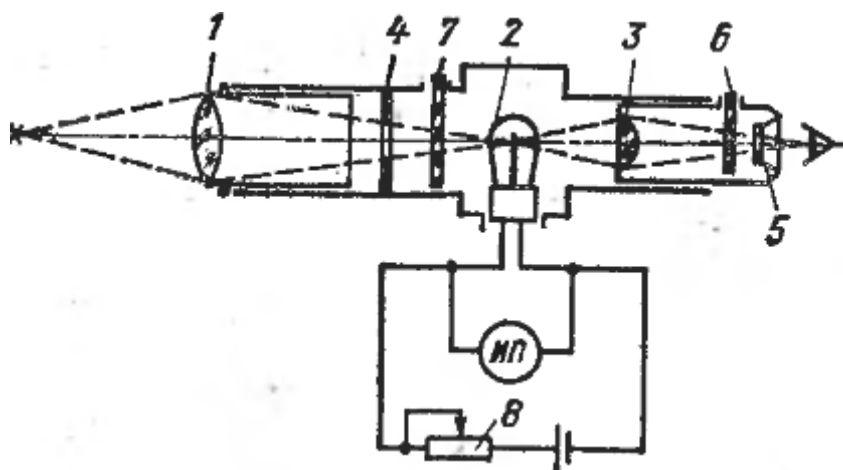
*Яркостной температурой* реального тела называется такая температура черного тела, при которой спектральные энергетические яркости реального тела, имеющего температуру  $T$  и черного тела в лучах той же длины волны равны между собой.

### *Оптические пирометры*

Оптические пирометры или так называемые пирометры визуальные с «исчезающей» нитью переменного накала широко применяются для измерения яркостной температуры в видимой области спектра.

Интервал измеряемых температур для общепромышленных пирометров с исчезающей нитью установлен от 700 до 8000 °С в видимой области спектра. Измерение яркостных температур пирометрами с исчезающей нитью основано на сравнении в свете эффективной длины волны в видимой области спектра яркости исследуемого тела с яркостью нити пирометрической лампы. При этом в качестве чувствительного элемента (лучеприемника) для фиксирования наличия или отсутствия равновесия яркостей двух одновременно рассматриваемых изображений тел служит человеческий глаз. Вследствие этого измерения температуры пирометром с исчезающей нитью отличаются известной субъективностью, что следует иметь в виду при их применении. Пирометр (см. рисунок 5) состоит из первичного преобразователя (телескопа), измерительного прибора и источника питания. Изображение объекта, температуру которого необходимо измерить, с помощью объектива создается в фокальной плоскости телескопа. В этой же плоскости расположена вольфрамовая нить пирометрической лампы. Окуляр телескопа, предназначенный для наблюдения нити лампы на фоне изображения источника излучения (объекта), может перемещаться вдоль оптической оси, что дает возможность устанавливать необходимую видимость нити лампы на фоне изображения объекта. Для постоянства и ограничения углов входа и выхода в оптической системе телескопа установлены две диафрагмы. При строго определенных значениях входного и выходного углов, размера отверстия входной диафрагмы, диаметра объектива в свету, фокусного расстояния окулярной линзы и диаметра выходного яркости и измерения он должен быть обязательно введен в поле зрения.

Накал нити пирометрической лампы, а следовательно, и ее яркость зависят от протекающей по нити силы тока, которая регулируется с помощью реостата.



1— объектив; 2 — пирометрическая лампа; 3 — окуляр; 4 — диафрагма входная;  
5 — диафрагма выходная; 6 — красный светофильтр; 7 — поглощающее стекло;  
8 — реостат.

Рисунок 5 - Схема устройства оптического пирометра  
с исчезающей нитью накала

В общепромышленных оптических пирометрах в качестве измерительного прибора используется показывающий милливольтметр со шкалой, позволяющей производить отсчет яркостной температуры, выраженной в градусах Цельсия. В некоторых типах оптических пирометров в качестве показывающего прибора применяется миллиамперметр, включаемый последовательно с нитью лампы. Следует отметить, что при начале свечения нити лампы ток составляет примерно 50 % тока при накале нити, соответствующем температуре верхнего предела измерения, в то время как напряжение на зажимах лампы достигает примерно 25 % напряжения, соответствующего той же температуре. Поэтому измерять напряжение на зажимах лампы выгоднее, чем ток, так как в этом случае лучше используется шкала электроизмерительного прибора. В оптических пирометрах повышенной точности и образцовых в качестве измерительных приборов используются потенциометры, обеспечивающие большую точность измерения.

При фокусировке телескопа объектив перемещают вдоль оптической оси, добиваясь резкой видимости объекта и совпадения плоскости его изображения с плоскостью нити лампы. Когда телескоп сфокусирован на объект, яркостная температура которого измеряется, в поле зрения на фоне изображения источника видна верхняя часть дуги нити лампы. Если при этом яркость нити будет меньше, чем яркость фона изображения источника, то нить представится черной; если фон имеет меньшую по сравнению с нитью яркость, то нить будет выглядеть как светлая дуга на более темном фоне. Меняя сопротивление реостата, можно установить такую силу тока, при которой в пределах контрастной чувствительности человеческого глаза равенство яркостей нити и фона создает эффект исчезновения нити, которая перестает быть видимой. Соответствующее этому равенству яркостей напряжение на зажимах лампы отсчитывается по включенному в цепь измерительному прибору. Для удобства применения рабочих пирометров показывающие приборы снабжаются обычно шкалой,

позволяющей отсчитывать непосредственно яркостную температуру, выраженную в градусах Цельсия.

Надежность работы оптических пирометров определяется главным образом стабильностью характеристик пирометрической лампы и постоянством показаний измерительного прибора. Опыт показал, что у пирометрической лампы с вольфрамовой нитью в течение очень долгого времени сохраняется постоянство характеристик, т. е. зависимость яркости нити от силы тока, протекающего через нее, если, нить лампы не подвергается нагреву выше  $1400\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Поэтому для измерения яркостной температуры выше  $1400\text{ }^{\circ}\text{C}$  телескоп оптического пирометра снабжают поглощающим стеклом, помещаемым между объективом и пирометрической лампой. Поглощающее стекло может быть установлено и перед объективом в целях уменьшения его нагрева. Поглощающее стекло, предназначенное для ослабления яркости источника излучения, обычно характеризуют его коэффициентом пропускания. Значение этого коэффициента показывает, какая доля лучистой энергии спектрального участка, используемого в оптическом пирометре, упавшая на стекло, пропускается им. Таким образом, измерение яркостных температур с включенным поглощающим стеклом производится путем сравнения неослабленной яркости нити пирометрической лампы с ослабленной яркостью источника излучения.

В приборах, имеющих верхний предел измерений  $2000\text{ }^{\circ}\text{C}$ , устанавливают поглощающее стекло такой оптической плотности, чтобы при яркостной температуре объекта  $2000\text{ }^{\circ}\text{C}$  яркостная температура изображения не превышала  $1400\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Некоторые типы оптических пирометров снабжаются двумя поглощающими стеклами: одно, например, для измерения температур от  $1200$  до  $2000\text{ }^{\circ}\text{C}$ , второе — от  $1800$  до  $3000\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

### *Фотоэлектрические пирометры*

Фотоэлектрические пирометры являются автоматическими показывающими и записывающими приборами. Они позволяют измерять и записывать яркостную температуру неподвижных или движущихся тел, нагретых до видимого свечения, например температуры при высокочастотном нагреве, температуры прокатываемого металла и т. п.

Фотоэлектрические методы измерения яркостей широко используются в прецизионных фотоэлектрических установках, применяемых для научных исследований и эталонных работ в области оптической пирометрии. Фотоэлектрические методы позволили превзойти точность в измерении яркостей, которая была достигнута в визуальной оптической пирометрии, так как в последнем случае точность ограничена контрастной чувствительностью человеческого глаза.

В фотоэлектрических пирометрах в качестве приемника излучения (чувствительного элемента) используют фотоэлемент, фотосопротивление и т. п. При освещении фотоэлемента в цепи его возникает ток, пропорциональный световому потоку, испускаемому нагретым телом. Следует отметить, что применяемые фотоэлементы (сурьмяно-цезиевые, кислородно-цезиевые, с запирающим слоем и др.) обладают различной спектральной чувствительностью, которая зависит от типа фотоэлемента.

В зависимости от того, какой рабочий спектральный интервал используется в существующих фотоэлектрических пирометрах, они могут быть разделены на две группы. К первой группе относятся фотоэлектрические пирометры, у которых при применении

красного светофильтра с областью пропускания, начинающейся с длины волны около 0,6 мкм, используется сравнительно узкий рабочий спектральный интервал фотоэлемента — от 0,6 до 0,72 мкм. Благодаря этому у пирометров этого типа и у визуальных оптических пирометров эффективные длины волн практически совпадают. Градуировка и поверка фотоэлектрических пирометров этого типа производится с помощью температурных ламп, снабженных стеклом ПС-5 и градуированных на яркостные температуры в свете длины волны 0,65 мкм.

Широко применяемым фотоэлектрическим пирометром первой группы является прибор ФЭП-4 с нижним пределом измерения 800 °С.

Ко второй группе относятся фотоэлектрические пирометры, использующие широкие спектральные области излучения. Эффективные длины волн у фотоэлектрических пирометров этого типа значительно различаются. Яркостные температуры, измеренные фотоэлектрическими пирометрами, со значительно различающимися эффективными длинами волн, характеризуются несравнимыми значениями. Широкие спектральные интервалы, используемые в фотоэлектрических пирометрах, исключают возможность осуществлять их градуировку и поверку с помощью температурных ламп, градуированных в свете какой-либо определенной длины волны. Поэтому фотоэлектрические пирометры второй группы градуируются и проверяются только по модели черного тела.

Переход от яркостных температур, измеренных фотоэлектрическими пирометрами этого типа, к действительной температуре физического тела представляет большие трудности, так как для этого необходимо знать значения коэффициентов излучения для эффективных длин волн, лежащих в различных интервалах длин волн.

Для ознакомления с устройством фотоэлектрических пирометров в качестве примера рассмотрим применяемые пирометры ФЭП-4. В пирометрах этого типа с диапазоном измерения яркостной температуры от 800 до 4000 °С используется вакуумный сурьмяно-цезиевый фотоэлемент типа СЦВ-51, чувствительный к излучению только видимой области спектра. На рисунке 7 представлены кривые спектральной чувствительности сурьмяно-цезиевого фотоэлемента 1 и пропускания красного светофильтра 2.

ФЭП-4 состоит из следующих отдельных блоков: первичного преобразователя (визирной головки) 1, включающего в себя фотоэлемент 2, оптическую систему, модулятор света 3, лампу обратной связи 4 и двухкаскадный электронный усилитель 5; силового блока 6; феррорезонансного стабилизатора напряжения 7; быстродействующего автоматического потенциометра 8; разделительного трансформатора 9.

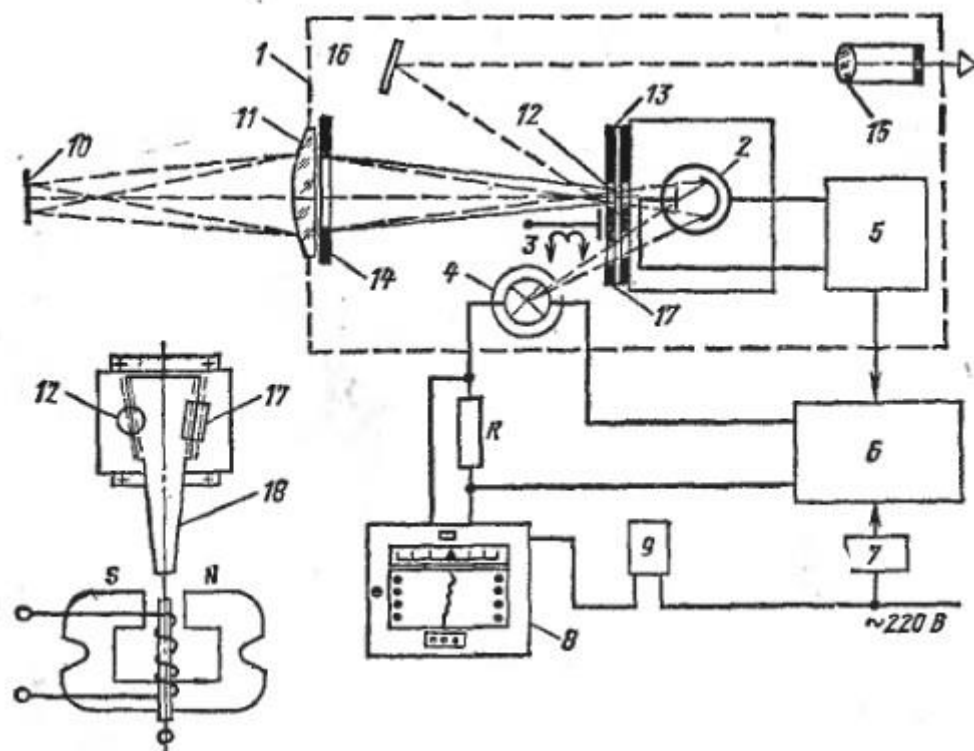


Рисунок 7 – Схема устройства фотоэлектрического пирометра ФЭП – 4

Изображение источника излучения 10 с помощью объектива 11 создается в плоскости отверстия 12 в держателе красного светофильтра 13, установленного перед фотоэлементом 2. Неподвижная диафрагма 14, установленная за объективом, обеспечивает постоянство входного угла, а размер отверстия 12 определяет ту часть светового потока, которая создает освещенность катода фотоэлемента. При фокусировке изображение объекта 10, которое рассматривается через визирное устройство, состоящее из окуляра 15 и наклонного зеркала 16, должно полностью перекрывать отверстие 12. В этом случае световой поток, падающий на катод фотоэлемента, зависит только от яркости объекта, а следовательно, и от яркостной температуры его.

Через второе отверстие 17 в держателе красного светофильтра на катод фотоэлемента подается световой поток от лампы 4, питаемой током выходного каскада силового блока 6. С помощью этой лампы в пирометре осуществляется обратная связь по световому потоку.

Перед держателем красного светофильтра, а вместе с тем и перед фотоэлементом установлена заслонка 18 модулятора света 5. С помощью этого устройства световые потоки, падающие на катод фотоэлемента, от объекта и лампы обратной связи модулируются с частотой 50 Гц в противофазе. При неравенстве этих световых нагонов в цепи фотоэлемента потечет ток, переменная составляющая которого пропорциональна разности освещенностей катода обоими источниками. Переменная составляющая фототока усиливается электронным усилителем 5, выпрямляется фазовым детектором силового блока 6 и подается на сетки ламп его выходного каскада-усилителя постоянного тока. В общую цепь катодов ламп этого выходного каскада включена последовательно лампа обратной связи. При этом в цепи этой лампы ток накала будет меняться до тех пор, пока на катоде фотоэлемента не уравниваются световые потоки от источника излучения и лампы. Следует отметить, что световой поток от лампы обратной связи несколько

отличается от потока визируемого объекта, однако благодаря большому коэффициенту усиления системы разность между этими потоками мала. Таким образом, с достаточной точностью можно считать, что сила тока в цепи лампы обратной связи однозначно связана с яркостной температурой визируемого тела. В цепь лампы обратной связи включен постоянный калиброванный резистор  $R$ , падение напряжения на котором измеряется быстродействующим автоматическим потенциометром, снабженным шкалой, позволяющей производить отсчет яркостной температуры, выраженной в градусах Цельсия.

Пределы допускаемой основной погрешности показаний пирометров с диапазоном измерения от 800 до 2000 °С не превышают  $\pm 1$  % верхнего предела измерения. Для двухшкальных пирометров с диапазоном измерения 1200 ÷ 2000 °С предел допускаемой основной погрешности  $\pm 20$  °С, а для второй шкалы с верхним пределом измерений выше 2000 °С не превышает  $\pm 1,5$  % верхнего предела измерения. Время установления показаний пирометра около 1 с. Порог чувствительности пирометра составляет 0,1 % верхнего предела измерения прибора.

## 2.2 Задача

2.2.1 Термопреобразователь (термопара) установлен в газоходе, футерованном огнеупорным кирпичом. Температура, показываемая термометром  $t_T$ , °С, а температура стенки  $t_{СТ}$ , °С. Коэффициент теплоотдачи от газового потока к термопреобразователю  $\alpha_K = 375$  Вт/(м·К). Коэффициент теплоты чехла термопреобразователя  $E_T = 0,5$ .

Считая газ лучепрозрачным определить погрешность измерения, вызванную лучистым теплообменом. Как изменится эта погрешность, если температура стенки повысится на 5 %, за счет улучшения изоляции газохода?

Данные для решения задачи принять по таблице 2.2.1.

Таблица 2.2.1 - Данные для решения задачи

| Предпоследняя цифра шифра | $t_T$ , °С | Последняя цифра шифра | $t_{СТ}$ , °С |
|---------------------------|------------|-----------------------|---------------|
| 1                         | 1100       | 1                     | 1030          |
| 2                         | 1102       | 2                     | 1032          |
| 3                         | 1104       | 3                     | 1034          |
| 4                         | 1106       | 4                     | 1036          |
| 5                         | 1108       | 5                     | 1038          |
| 6                         | 1110       | 6                     | 1040          |
| 7                         | 1112       | 7                     | 1042          |
| 8                         | 1114       | 8                     | 1044          |
| 9                         | 1116       | 9                     | 1046          |
| 0                         | 1118       | 0                     | 1048          |

## 2.3 Контрольные вопросы

1 В чем заключается компенсационный метод измерения сопротивления?

- 2 Какими методами можно измерить сопротивление термометра с помощью моста?
- 3 Опишите принцип измерения сопротивления термометра уравновешенным мостом;
- 4 Опишите принцип измерения сопротивления термометра неуравновешенным мостом;
- 5 Опишите принцип измерения температуры тел по их тепловому излучению;
- 6 Что называется яркостной температурой реального тела?
- 7 Дайте характеристику оптическим пирометрам;
- 8 Опишите особенности лабораторного оптического пирометра типа ОП;
- 9 Дайте характеристику фотоэлектрическим пирометрам;
- 10 Опишите особенности устройства фотоэлектрического пирометра ФЭП – 4.

## **Практическое занятие 2. Изучение конструкции и принципа действия приборов для измерения давления**

*Цель.* Определение погрешности измерения. Изучение принципа деятельности, конструкции, области применения приборов для измерения давления и разряжения, овладения практическими навыками по поверке приборов.

### **1.1 Теоретические сведения**

Единица измерения давления в Международной системе единиц (СИ) является паскаль (Па). Однако до настоящего времени применяются также приборы, отградуированные в кгс/см<sup>2</sup>, мм вод. ст., мм рт. ст. и барах. Между этими единицами и паскалем имеют место следующие соотношения: 1 кг/см<sup>2</sup> = 98066,5 Па; 1 мм вод. ст.= 9,80665 Па; 1 мм рт.ст.=133,322 Па; 1 бар = 10<sup>5</sup> Па.

Приборы, используемые для сигнализации и регулирования давления и разности давлений, подразделяют на приборы с релейными и плавными характеристиками. Приборы с релейными характеристиками применяют для позиционного регулирования, подачи сигналов и защиты, а приборы с плавными характеристиками - только для регулирования.

Общим для всех приборов этого класса является использование упругих чувствительных элементов, преобразующих давление или разность давлений в механическое перемещение посредством упругой деформации.

Для измерения давления и разности давлений наибольшее распространение получили различные виды жидкостных и пружинных (с упругим чувствительным элементом) приборов.

В жидкостных приборах измеряемое давление (разность давлений) уравнивается давлением столба жидкости (разностью давлений столбов жидкости). Давление столба жидкости определяется высотой столба, полностью и ускорением свободного падения, поэтому погрешности измерения давления жидкостными манометрами связаны с погрешностями измерения высоты столба жидкости, точностью определения плотности, которая зависит от температуры, и ускорения свободного падения, определяемого географической широтой и высотой над уровнем моря.

Основной формулой для жидкостных приборов давления является формула, устанавливающая зависимость между измеряемым избыточным давлением или перепадом давлений  $h$  в обоих сосудах прибора:

$$\Delta p = h \rho g \quad (1.1)$$

Из этой формулы легко могут быть получены выражения для погрешностей измерения, вызванных ошибками отсчета  $h$  в м,  $\rho$  в кг/м<sup>3</sup>,  $g$  в м/с<sup>2</sup>, то будет Па.

В пружинных приборах давление определяется по деформации упругих чувствительных элементов или развиваемой ими силе. На показания пружинных приборов может оказывать влияние температура окружающей среды, которая вызывает изменение свойств чувствительного элемента и передаточного механизма. Большое распространение получили приборы для измерения давления с унифицированным выходным сигналом, работающие по принципу компенсации усилий. Приборы этого типа применяются для измерения давления, разрежения, вакуума и разности давлений в широком диапазоне значений измеряемого параметра.

При решении задач по приборам с силовой компенсацией следует четко представлять, что в статистическом режиме в кинематической схеме этих приборов происходит уравнивание усилия, развиваемого чувствительным элементом, усилием, действующим на этот элемент со стороны устройства обратной связи (электрического или пневматического). Эти усилия легко могут быть рассчитаны по известным усилиям, развиваемым отдельными элементами, и соотношению плеч. В настоящее время практически все выпускаемые приборы с силовой компенсацией имеют унифицированный выходной сигнал (электрический или пневматический).

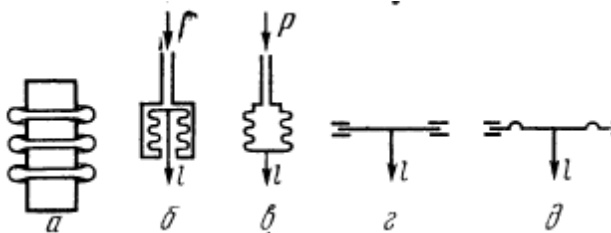
#### 1.1.1 Чувствительные элементы

В приборах, применяемых в холодильной технике, применяют два типа упругих чувствительных элементов: сильфоны и мембраны.

##### 1.1.1.1 Сильфоны

Сильфон (рисунок 1, *а*) представляет собой тонкостенную гофрированную трубку. Гофры выполнены в виде глубоких волнообразных складок.

При использовании сильфона в качестве чувствительного элемента он закрывается одним или двумя днищами. На рисунке 1, *б* показана схема сильфонного чувствительного элемента для измерения давления  $p$ . Сильфон, помещаемый в коробку, имеет одно верхнее днище. Измеряемое давление подается в полость, образуемую сильфоном и коробкой. При повышении давления сильфон сжимается.



$a$  - сиффон в разрезе;  $b, в$  - схемы сиффонных чувствительных элементов;  
 $з, д$  - мембраны плоская и гофрированная

#### Рисунок 1 - Упругие чувствительные элементы

В чувствительном элементе с двумя днищами (рисунок 1,  $в$ ) сиффон работает на растяжение.

Сиффоны характеризуются относительно прямолинейной зависимостью деформации от давления в широком диапазоне его изменений. Удлинение сиффона под действием разности давлений, действующих изнутри и извне, можно определить по формуле:

$$l = \frac{(p_1 - p_2) F_{\text{эф}}}{k}, \quad (1.2)$$

где  $p_1$  и  $p_2$  - внутреннее и внешнее давления;

$F_{\text{эф}}$  - эффективная площадь сиффона;

$k$  - жесткость сиффона.

Сиффоны изготовляют из медных сплавов (томпак, полутомпак, бронза) и нержавеющей стали.

##### 1.1.1.2 Мембраны

Мембраны представляют собой круглые пластины, заделанные по периметру. Мембраны бывают плоские, гофрированные и хлопающие.

Плоские мембраны (рисунок 1,  $з$ ), предназначенные для малых прогибов, обычно используют в случаях, когда не требуется значительных перемещений. Плоские мембраны просты в изготовлении и обладают хорошими динамическими свойствами.

Гофрированные мембраны (рисунок 1,  $д$ ) применяют в случаях, когда необходимо получить большие перемещения. Для уменьшения жесткости на мембранах выдавливаются кольцевые гофры, которые бывают синусоидальной, круговой, трапецидальной и треугольной формы. Иногда для повышения чувствительности применяют мембранные коробки и блоки, состоящие из нескольких коробок.

Хлопающие мембраны могут применяться в приборах двухпозиционного действия. Такая мембрана представляет собой металлическую куполообразную пластину, которая под действием давления теряет устойчивость, в результате чего скачкообразно перебрасывается из одного положения в другое.

Мембраны изготовляют из специальных сплавов (бериллиевой бронзы, марганцевого мельхиора, дисперсионно-твердеющего сплава и др.), обладающих хорошими упругими свойствами.

##### 1.1.2 Приборы с релейными характеристиками

К приборам с релейными характеристиками относят двухпозиционные датчики-реле давления и разности давлений (далее просто реле) и трехпозиционные регулирующие приборы давления.

Реле давления воспринимает контролируемое давление и преобразует его в замыкание или размыкание выходного электрического устройства.

В зависимости от числа чувствительных элементов, действующих на выходное устройство, различают реле одинарные (однотатчиковые) и сдвоенные (двухдатчиковые). Одинарное реле воспринимает одно давление, в то время как сдвоенное контролирует два давления, действующих на общее выходное устройство.

Реле разности давлений представляет собой прибор, воспринимающий два давления и преобразующий их разность в замыкание или размыкание выходного электрического устройства.

Трехпозиционный регулирующий прибор давления - устройство, предназначенное для работы с исполнительными механизмами постоянной скорости. В зависимости от типа исполнительного механизма эти приборы могут входить в электрические, пневматические и гидравлические системы автоматического регулирования.

### 1.1.3 Жидкостные приборы давления с видимым уровнем (приборы U-образные и чашечные)

Приборы U-образные (двухтрубные) и чашечные (однотрубные) относятся к группе жидкостных приборов с видимым уровнем. Они применяются в качестве манометров (напорометров) для измерения избыточного давления воздуха и неагрессивных газов до 700 мм вод. ст. (7000 Па) и 735 мм рт. ст. (0,1 МПа), тягомеров для измерения разрежения газовых сред до 700 мм вод. ст. (7000 Па), вакуумметров для измерения вакуума (разрежения) до 760 мм рт. ст. (0,101 МПа) и дифференциальных манометров для измерения разности давлений неагрессивных газов, находящихся под давлением, близким к атмосферному, до 700 мм вод. ст. (7000 Па) и неагрессивных жидкостей, газов и паров, находящихся под давлением более 1 кгс/см<sup>2</sup> (0,1 МПа), до 700 мм рт. ст. (0,09 МПа).

Приборы U-образные и чашечные используются в промышленности как местные приборы, т. е. они устанавливаются на площадках обслуживания или на отдельных элементах технологического оборудования. Приборы этого типа применяют в качестве контрольных и образцовых манометров и вакуумметров для проверки рабочих приборов, рассчитанных на те же диапазоны измерения давления, разрежения или разности давлений. На рисунке 1 показана схема U-образного (двухтрубного) манометра. Он состоит из U-образной стеклянной трубки, заполняемой примерно до половины своей высоты рабочей жидкостью, и шкалы, позволяющей производить отсчет уровней в обоих коленях. Измеряемое давление, разрежение или разность давлений уравнивается и измеряется столбом  $h$  рабочей жидкости, определяемым как сумма столбов  $h_1$  и  $h_2$  в обоих коленях. При этом устраняется погрешность из-за некоторого возможного различия сечений обоих колен U-образной трубки.

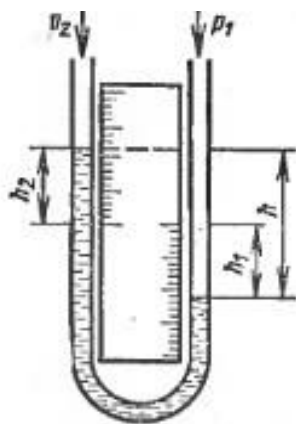


Рисунок 2 - Схема U-образного (двухтрубного) манометра

В качестве рабочей жидкости обычно применяют воду или ртуть, а иногда и другие жидкости. Внутренний диаметр стеклянной трубки для изготовления U-образного прибора должен быть не менее  $8 \div 10$  мм и по возможности одинаков по всей ее длине. При малом диаметре трубки капиллярные свойства воды не позволяют применять ее в качестве рабочей жидкости в приборах этого типа. В этом случае в качестве рабочей жидкости рекомендуется применять спирт.

При применении U-образный манометр должен устанавливаться вертикально по отвесу.

Для измерения избыточного давления в объекте правое колено трубки прибора соединяют с объектом, а левое оставляют открытым (сообщенным с атмосферой); при измерении разрежения - левое колено прибора соединяют с объектом, а правое - оставляют открытым. При измерении разности давлений большее давление подводится к правому, а меньшее - к левому колену трубки прибора.

Обычно с помощью U-образного прибора давление, разрежение или разность давлений измеряют в миллиметрах водяного или ртутного столба. Результат измерения может быть выражен не в миллиметрах столба рабочей жидкости, а в Паскалях по формуле:

$$\delta = gh(\rho - \rho_c), \quad (1.3)$$

где  $g$  - местное ускорение свободного падения,  $\text{м/с}^2$ ;

$h$  - разность уровней рабочей жидкости, м;

$\rho$  - плотность рабочей жидкости,  $\text{кг/м}^3$ ;

$\rho_c$  - плотность среды над рабочей жидкостью,  $\text{кг/м}^3$ .

Если  $\rho \ll \rho_c$  уравнение (1.3) принимает вид (1.1).

Для перевода значения давления, выраженного в Па, в значение, выраженное в  $\text{кгс/м}^2$ , необходимо полученный результат умножить на 0,102.

Если отсчет высоты столба  $h$  рабочей жидкости по U-образному прибору производят невооруженным глазом, то при цене деления шкалы в 1 мм при отсчете в двух коленях пределы допускаемой основной погрешности измерения давления, разрежения или разности давлений не превышают  $\pm 2$  мм столба рабочей жидкости (при этом

учитывается и погрешность самой шкалы). Значения плотности рабочих жидкостей, наиболее часто применяемых в этих приборах (вода, ртуть), могут быть взяты из таблиц с погрешностью, не превышающей 0,005 %. При этом необходимо быть уверенным в чистоте взятых жидкостей. Таким образом, практически погрешность определения плотности рабочей жидкости настолько мала, что на точность измерения она влиять не может и относительная погрешность при измерении давления, разрежения или разности давлений U-образным прибором зависит в основном от высоты столба рабочей жидкости и точности его отсчета.

Для увеличения точности отсчета высоты столба рабочей жидкости U-образные приборы повышенной точности и образцовые снабжают зеркальной шкалой. Для приборов такого типа пределы допускаемой основной погрешности показаний не превышают  $\pm 1$  мм столба рабочей жидкости.

Чашечный (однотрубный) манометр, показанный на рисунке 2, состоит из цилиндрического сосуда и сообщающейся с ним измерительной стеклянной трубки. При этом площадь сечения сосуда значительно больше, чем измерительной трубки. Рабочую жидкость (воду, ртуть или другую жидкость) заливают в широкий сосуд настолько, чтобы уровень ее в измерительной трубке находился против нулевой отметки шкалы. При измерении давления в объекте его соединяют с помощью трубки с сосудом прибора, а при измерении разрежения - с измерительной трубкой. При измерении разности давлений большее давление подается в сосуд, а меньшее - в измерительную трубку.

Пусть под действием давления, разрежения или разности давлений жидкость в измерительной трубке поднимется на высоту  $h_1$ , а в широком сосуде опустится на высоту  $h_2$ , тогда высота столба  $h$ , соответствующая измеряемой величине, будет равна:

$$h = h_1 + h_2. \quad (1.4)$$

Если  $F_1$  - площадь сечения измерительной трубки, а  $F_2$  - широкого сосуда, то:

$$F_1 h_1 = F_2 h_2, \quad (1.5)$$

так как объем  $F_1 h_1$  жидкости в измерительной трубке равен объему  $F_2 h_2$  жидкости, вытесненной из широкого сосуда.

Решив уравнения (3.4) и (3.5) относительно  $h$ , получим:

$$h = h_1 \left( 1 + \frac{F_1}{F_2} \right) = h_1 \left( 1 + \frac{d^2}{D^2} \right), \quad (1.6)$$

т. е. действительная высота столба  $h$ , соответствующая измеряемой величине, больше отсчитываемой высоты  $h_1$ , на значение  $h_1 \frac{F_1}{F_2}$  или  $h_1 \frac{d^2}{D^2}$ , где  $d$ ,  $D$  — внутренние диаметры измерительной трубки и широкого сосуда, м.

С помощью однотрубного манометра давление, разрежение или разность давлений обычно измеряют в миллиметрах столба рабочей жидкости. В этом случае измеряемое давление определяют по формуле (1.6).

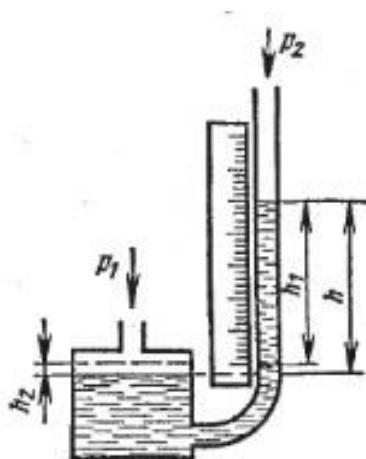


Рисунок 3 - Схема чашечного (однотрубного) манометра

Если результаты измерения должны быть выражены не в миллиметрах столба рабочей жидкости, а в Паскалях, то пользуются формулами (3.1), (3.3) и (1.6).

Основным достоинством чашечного прибора перед U-образным является то, что он позволяет производить только один отсчет. В этом случае при цене деления шкалы в 1 мм отсчет высоты столба в измерительной трубке может быть произведен с погрешностью, не превышающей  $\pm$  мм столба рабочей жидкости. Так как при измерении давления, разрежения или разности давлений однотрубным прибором уровень жидкости в широком сосуде понижается, то необходимо вводить поправку в его показания или предварительно градуировать прибор в единицах давления с учетом этой поправки. Погрешностями самой шкалы и определения плотности рабочей жидкости можно пренебречь.

## 1.2 Задачи

1.2.1 В U-образную трубку налиты вода и бензин. Определить плотность бензина, если известны  $h_6$  и  $h_в$ . Данные для решения задачи принять по таблице 1.2.1.

Таблица 1.2.1 - Данные для решения задачи

| Предпоследняя цифра шифра | $h_6$ , мм | Последняя цифра шифра | $h_в$ , мм |
|---------------------------|------------|-----------------------|------------|
| 1                         | 500        | 1                     | 350,0      |
| 2                         | 501        | 2                     | 350,1      |
| 3                         | 502        | 3                     | 350,2      |
| 4                         | 503        | 4                     | 350,3      |
| 5                         | 504        | 5                     | 350,4      |
| 6                         | 505        | 6                     | 350,5      |
| 7                         | 506        | 7                     | 350,6      |
| 8                         | 507        | 8                     | 350,7      |
| 9                         | 508        | 9                     | 350,8      |
| 0                         | 509        | 0                     | 350,9      |

1.2.2 В сосуд с жидкостью вставлены 2 плужера с диаметрами  $d_1$  и  $d_2$ . На один из них действует сила  $F_1 = 10^3$  Н. Определить показания манометра и силу, действующую на второй плужер. Данные для решения задачи принять по таблице 1.1.2.2.

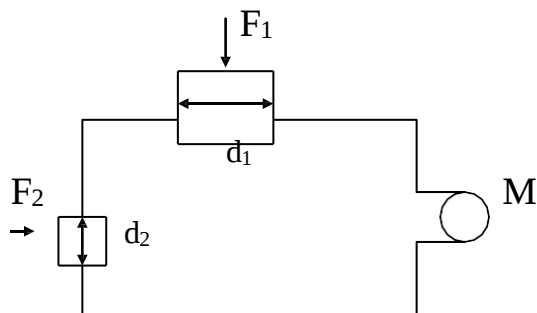


Рисунок 4 - Схема для решения задачи 1.2.2

Таблица 1.2.2 - Данные для решения задачи

| Предпоследняя цифра шифра | $d_1$ , мм | Последняя цифра шифра | $d_2$ , мм |
|---------------------------|------------|-----------------------|------------|
| 1                         | 140        | 1                     | 70         |
| 2                         | 150        | 2                     | 75         |
| 3                         | 160        | 3                     | 80         |
| 4                         | 170        | 4                     | 85         |
| 5                         | 180        | 5                     | 90         |
| 6                         | 190        | 6                     | 95         |
| 7                         | 200        | 7                     | 100        |
| 8                         | 210        | 8                     | 105        |
| 9                         | 220        | 9                     | 110        |
| 0                         | 230        | 0                     | 115        |

### 1.3 Контрольные вопросы

1 В каких единицах измеряется давление в системе (СИ) и других системах измерения единиц?

2 Какие приборы используют для измерения давления и разности давлений?

3 Какие чувствительные элементы используют в приборах, применяемых в холодильной технике?

4 Опишите конструктивные особенности и принцип действия сильфонов;

5 Что представляют собой мембраны, каких видов они бывают?

6 Какие измерительные приборы относятся к приборам с релейными характеристиками, каких видов они бывают?

7 В чем особенность жидкостных приборов для измерения давления?

8 В чем особенность пружинных приборов для измерения давления?

9 Опишите жидкостные приборы U-образные (двухтрубные);

10 Опишите жидкостные приборы чашечные (однотрубные).

### **Практическое занятие 3. Изучение конструкции и принципа действия уровнемеров**

*Цель.* Изучить принцип действия, конструкции и область применения приборов для измерения уровня жидких пищевых продуктов.

#### **3.1 Теоретические сведения**

Измерение уровня жидкостей играет важную роль при автоматизации технологических процессов во многих отраслях промышленности. Эти измерения особенно важны в тех случаях, когда поддержание некоторого постоянного уровня, например уровня воды в барабане парогенератора, уровня жидкости в резервуарах, аппаратах и других устройствах, связано с условиями безопасной работы оборудования. Технические средства, применяемые для измерения уровня жидкости, называются уровнемерами. Приборы, предназначенные для сигнализации предельных уровней жидкости, называются сигнализаторами уровня. Уровнемеры также имеют широкое применение в различных отраслях промышленности для измерения по уровню количества жидкости, находящейся в резервуарах, баках и других устройствах.

Уровнемеры, предназначенные для измерения уровня жидкости с целью поддержания его постоянным, имеют двустороннюю шкалу. Шкалы и диаграммная бумага этих уровнемеров градуируются в сантиметрах или метрах, а приборов, применяемых для измерения уровня воды в барабане парогенераторов, - в миллиметрах.

Уровнемеры, служащие для измерения по уровню количества жидкости в резервуарах, баках и других устройствах, имеют одностороннюю шкалу. Шкалы и диаграммная бумага этих уровнемеров градуируются в сантиметрах и метрах, а иногда в процентах.

Уровнемеры, применяемые для измерения уровня жидкости с целью поддержания его постоянным в определенных пределах, снабжают устройством для сигнализации предельных отклонений уровня от заданного значения.

У сигнализаторов уровня жидкости контактное устройство срабатывает при некотором заданном значении уровня для данного объекта.

В зависимости от требований, предъявляемых к автоматизации технологических процессов, применяют различные методы измерения уровня жидкости. Если нет необходимости в дистанционной передаче показаний, уровень жидкости с достаточной точностью и надежностью можно измерять с помощью указательных стекол.

Измерение уровня жидкости указательными стеклами основано на принципе сообщающихся сосудов. Конструкция арматуры и материал указательных стекол зависят от давления и температуры жидкости, уровень которой необходимо контролировать.

Для дистанционного измерения уровня жидкостей, находящихся под атмосферным, вакуумметрическим или избыточным давлением, применяют метод измерения по разности давлений с помощью дифманометров. Во многих отраслях промышленности используют также метод контроля уровня жидкостей с помощью поплавка (или буйка).

В химической, нефтехимической и в ряде других отраслей промышленности кроме указанных выше методов измерения уровня жидкостей находят применение емкостные, ультразвуковые, акустические и радиоизотопные уровнемеры. Для измерения уровня

агрессивных кристаллизирующихся жидкостей и пульп в открытых емкостях применяют пьезометрические уровнемеры.

В настоящее время существует большое число методов измерения уровня жидкостей и сыпучих тел. Одним из наиболее распространенных методов измерения уровня жидкостей является измерение гидростатического давления столба жидкости, осуществляемое водомерными стеклами и их разновидностями, а также манометрическими или пневмометрическими устройствами. Во всех этих методах, как правило, главной является погрешность за счет изменения плотности измеряемой жидкости от температуры. Для исключения или уменьшения этой погрешности создаются сложные измерительные системы, одновременно измеряющие гидростатическое давление жидкости и ее плотность и корректирующие затем показания уровнемера в соответствии с плотностью. Естественно, что усложнение измерительной системы уменьшает ее надежность.

Все системы измерения уровня жидкостей гидростатическим методом требуют тщательного анализа измерительной системы, соединительных линий, их температурного режима, особенностей работы измерительных преобразователей системы. Например, для одной и той же схемы измерения уровня в барабане парогенератора гидростатическим методом применения мембранных дифманометров вместо поплавковых существенно уменьшает возможные погрешности измерения уровня. Это объясняется тем, что объем жидкости, перемещающейся в мембранных дифманометрах при изменении измеряемого уровня, значительно меньше, чем в поплавковых.

Пневмометрический метод измерения уровня основан на измерении давления воздуха (инертного газа), уравнивающего гидростатическое давление столба жидкости. Поэтому кроме недостатков и особенностей гидростатического метода измерения здесь добавляется специфика пневмометрической системы.

Одним из наиболее простых и надежных являются поплавковые уровнемеры. Однако они практически не могут применяться при высоких давлениях. Некоторый процесс в этом отношении представляют буйковые уровнемеры, которые могут работать и при значительных давлениях. Но применение как поплавковых, так буйковых уровнемеров затруднено в агрессивных жидкостях и в средах с выпадающими осадками.

Емкостные уровнемеры могут применяться для измерения как непроводящих, так и проводящих жидкостей. Они пригодны для измерения уровня в широком диапазоне давлений и температур измеряемых сред, как агрессивных, так и неагрессивных. Показания их зависят от диэлектрической проницаемости среды, которая может изменяться с температурой. Применение компенсационных емкостей позволяет существенно уменьшить это влияние, но не исключает его полностью. Схемное исполнение электронной части емкостных уровнемеров достаточно сложно, что ограничивает их широкое распространение.

Радиоизотопные уровнемеры, как правило, применяются в тех случаях, когда непосредственный контакт с измеряемой средой по каким-либо причинам нежелателен (например, уровень жидкого хлора, шихты в доменной печи и т.д.). Следует иметь в виду, что на показания радиоизотопных уровнемеров практически не влияет изменение плотности измеряемой среды (для принципиальных схем, принятых в серийных приборах).

К приборам регулирования и сигнализации уровня, применяемым в холодильной технике, относят реле уровня, т. е. приборы с позиционными (релейными)

характеристиками (они используются в схемах двухпозиционного регулирования, сигнализации и защиты), регуляторы уровня прямого и непрямого действия без подвода внешней энергии (они могут иметь плавные и позиционные характеристики), а также регуляторы непрямого действия с подводом внешней энергии, в частности, пневматические.

Встречаются два основных вида регуляторов уровня: приточные и отточные. В приточном регуляторе, или регуляторе низкого давления (рисунок 1, а), регулирующий орган  $PO$  устанавливают на линии притока жидкости в сосуд  $C$ , а первичный преобразователь  $ППр$  находится под давлением  $p_2$  ( $p_2 < p_1$ ). В отточном регуляторе, или регуляторе высокого давления (рисунок 1, б), регулирующий орган расположен на линии оттока жидкости из сосуда, а первичный преобразователь работает под давлением  $p_1$ .

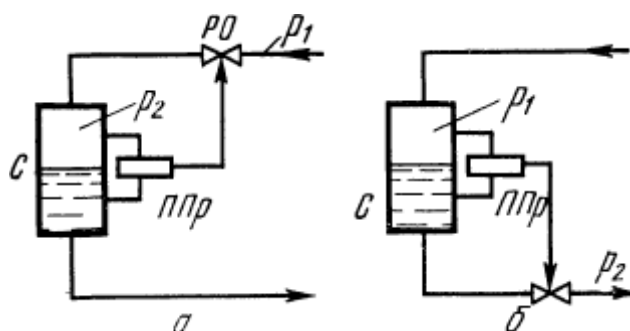
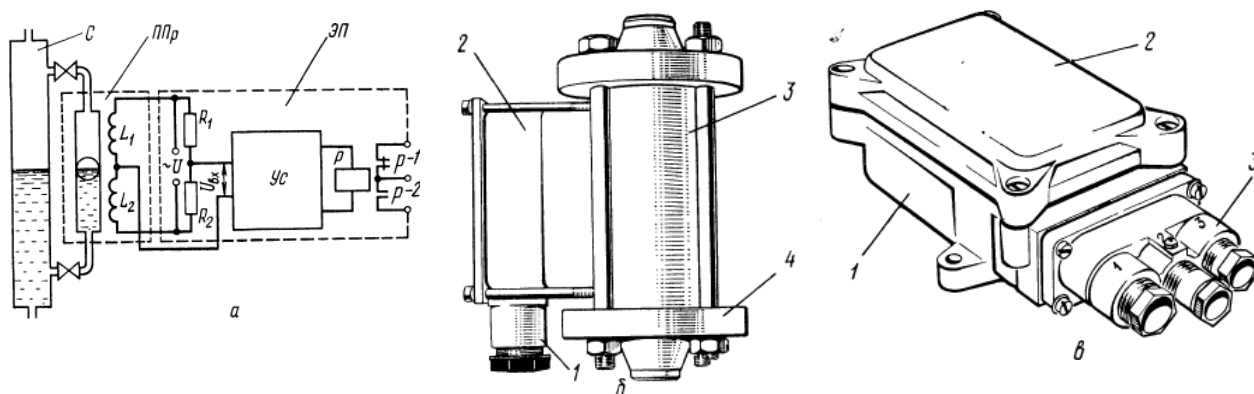


Рисунок 3 - Схема приточного (а) и отточного (б) регулятора уровня

### 3.1.1 Реле уровня

Применяемые в холодильной технике реле уровня чаще всего выполняются на основе первичных электрических преобразователей и электронных усилителей. Первичные преобразователи могут строиться на различных принципах, однако наиболее распространены поплавковые индуктивные преобразователи. В качестве усилителей передающих преобразователей используют схемы на полупроводниковых и интегральных элементах с контактным или бесконтактным выходным устройством. Устройство реле уровня рассмотрим на примере прибора ПРУ-5М (рисунок 2, а).



а - упрощенная принципиальная схема; б - внешний вид первичного преобразователя:

1 - ввод проводов; 2 - блок катушек индуктивности; 3 - цилиндрическая поплавковая камера; 4 - фланец; в - внешний вид передающего преобразователя: 1 - корпус; 2 - крышка; 3 - вводной разъем

Рисунок 2 - Реле уровня ПРУ-5М

Первичный преобразователь *ППр* представляет собой цилиндрическую поплавковую камеру с жидкостным и паровым патрубками. С помощью патрубков первичный преобразователь присоединяется к сосуду или аппарату *С*, в котором контролируется уровень жидкости.

В камере находится сферический поплавок из стали, который обладает необходимой плавучестью в рабочей среде. Положение поплавка точно соответствует уровню жидкости в сосуде.

Корпус цилиндрической поплавковой камеры выполнен из немагнитного материала, например нержавеющей стали, вследствие чего катушки индуктивности  $L_1$  и  $L_2$ , помещенные на внешней поверхности камеры, оказываются магнитно связанными с поплавком. Это означает, что их индуктивность зависит от положения поплавка: при высоком положении поплавка увеличивается индуктивность катушки  $L_1$  при низком - катушки  $L_2$ .

Катушки индуктивности включаются в четырехплечий мост с резисторами  $R_1$  и  $R_2$  питание которого осуществляется переменным током напряжением  $U$  порядка нескольких вольт. В среднем положении поплавка мост уравновешен и входное напряжение  $U_{вх}$  усилителя  $Ус$  равно нулю. При любом отклонении поплавка от среднего положения к усилителю подводится напряжение небаланса.

Электронный усилитель устроен так, что выходное электромагнитное реле  $P$  может срабатывать при повышении уровня (прямое включение первичного преобразователя) или при его понижении (инверсное включение).

На выходе имеются замыкающие и. размыкающие контакты, которые используются для управления исполнительными и сигнальными устройствами.

Реле уровня состоит из первичного преобразователя *ППр*, включающего поплавковую камеру и катушки индуктивности (рисунок 2, б), и передающего преобразователя (электронного прибора) *ЭП*, содержащего элементы моста, усилитель, выходное реле и устройство питания (рисунок 3, в).

### 3.1.2 Регуляторы уровня прямого и непрямого действия без подвода внешней энергии

Эти регуляторы различают по типу первичного преобразователя. Наиболее распространены поплавковые регуляторы. Реже встречаются другие преобразователи, в частности температурного типа.

Простейший поплавковый регулятор уровня прямого действия показан на рисунке 3. Это регулятор высокого давления (отточного типа) и предназначен для удаления жидкого хладагента из конденсатора, охлаждающих батарей при оттаивании и других аппаратов. Регулятор уровня дросселирует хладагент, разделяя стороны высокого и низкого давления и создавая надежный гидравлический затвор.

В поплавковой камере 10, имеющей съемную крышку 4 помещен поплавок 9, который тягой 8 соединен с противовесом 5, закрепленным шпилькой 6 на тяге 8. В свою

очередь тяга 8 соединена осью 7 со штоком 3 клапана 1, закрывающего выход из поплавковой камеры. В обвод клапана установлена трубка 2 для отвода газа, которая препятствует образованию газового «мешка».

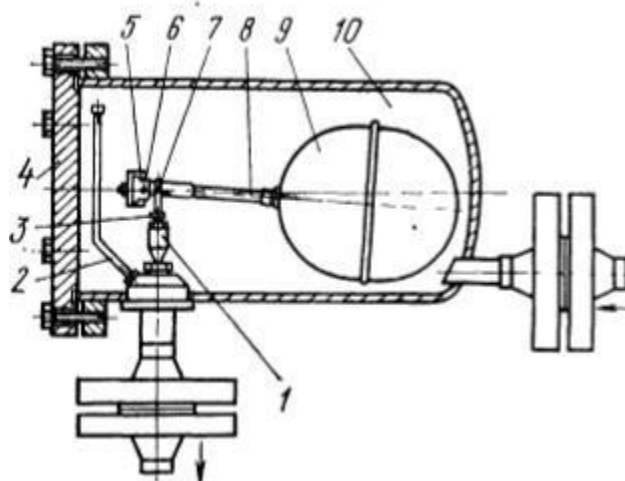
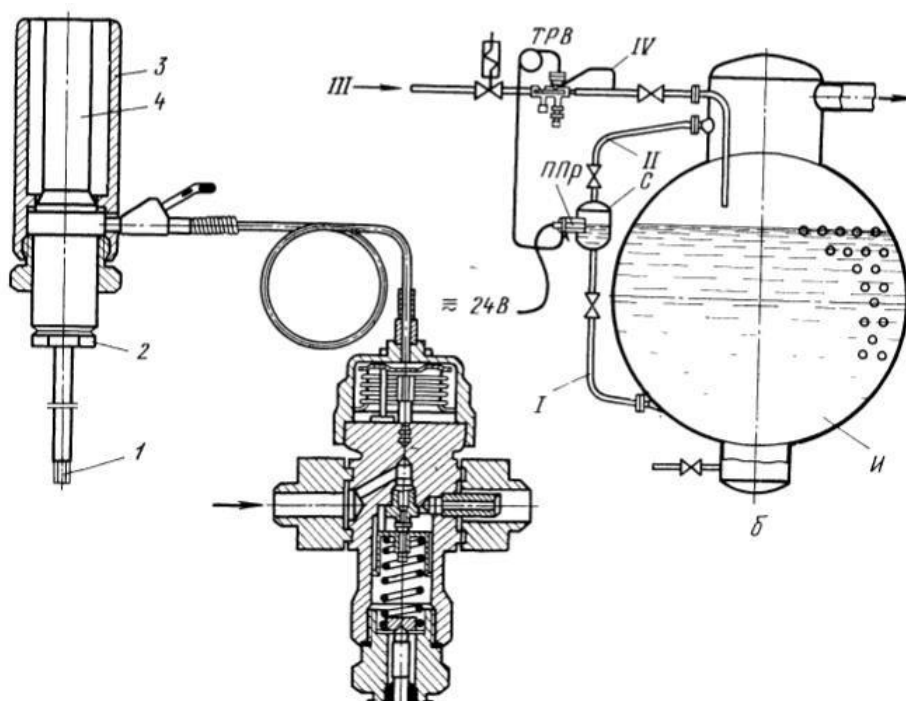


Рисунок 3 - Поплавковый регулятор уровня прямого действия

Сконденсировавшаяся жидкость подается к правому штуцеру и по мере накопления отводится через клапан в нижнюю трубу, соединенную с дренажным трубопроводом.

Поплавковые регуляторы уровня прямого действия обычно рассчитаны на сравнительно небольшую пропускную способность (до 500 л/ч).

Разновидностью регулятора уровня прямого действия является регулятор низкого давления с температурным преобразователем (рисунок 4, а).



а - устройство; б - схема присоединения

Рисунок 4 - Регулятор низкого давления с температурным преобразователем

Регулятор состоит из первичного преобразователя *ППр* и терморегулирующего вентиля, который выполняет функцию исполнительного устройства. Первичный преобразователь содержит термобаллон 3, заключенный в защитный чехол 4, который предотвращает попадание на термобаллон капель кипящей жидкости. В термобаллоне смонтирован маломощный электронагреватель, провода 1, к которому вводятся через сальник 2. Нагреватель питается постоянным или переменным током напряжением 24 В. Устройство терморегулирующего вентиля не отличается от устройства других ТРВ.

Работа регулятора низкого давления с температурным преобразователем основана на различии коэффициентов теплоотдачи подогретого термобаллона при погружении его в пар или жидкость.

На схеме (рисунок 4, б) показан вариант присоединения регулятора к кожухотрубному испарителю *И*. Сосуд *С*, в который вводят первичный преобразователь *ППр*, сообщается с испарителем через жидкостную и паровую линии / и //.

К входу регулятора *Р* подключается линия /// от конденсатора. Линия внешнего отбора давления *IV* присоединяется к трубе после регулятора.

Прибор настраивают таким образом, что при отключенном нагревателе термобаллона и уровне жидкости ниже термобаллона вентиль закрывается. После этого включают нагреватель.

Температура термобаллона, а следовательно, и давление внутри термосистемы зависят от соотношения тепловых потоков (нагреватель - термобаллон и термобаллон - рабочая среда).

При полностью залитом датчике тепловой поток от термобаллона максимальный, а температура минимальная. При этом клапан регулятора закрыт, хладагент в испаритель не поступает. По мере выпаривания жидкости уровень понижается, поверхность термобаллона, которая омывается жидкостью, уменьшается. В связи с этим средняя температура и давление заполнителя повышаются, клапан регулятора открывается, причем тем больше, чем ниже опускается уровень. Регулятор открывается полностью, когда уровень жидкости опускается до нижней образующей термобаллона.

Одним из преимуществ регулятора является принудительное закрытие вентиля отключением питания электронагревателя.

Пропускная способность регуляторов с температурным преобразователем зависит от размера применяемых ТРВ.

Регуляторы уровня непрямого действия без подвода внешней энергии, или пилотные регуляторы уровня, могут иметь двухпозиционные или плавные характеристики.

Примером пилотного регулятора с двухпозиционной характеристикой может служить регулятор типа ПРУД (рисунок 5, а).

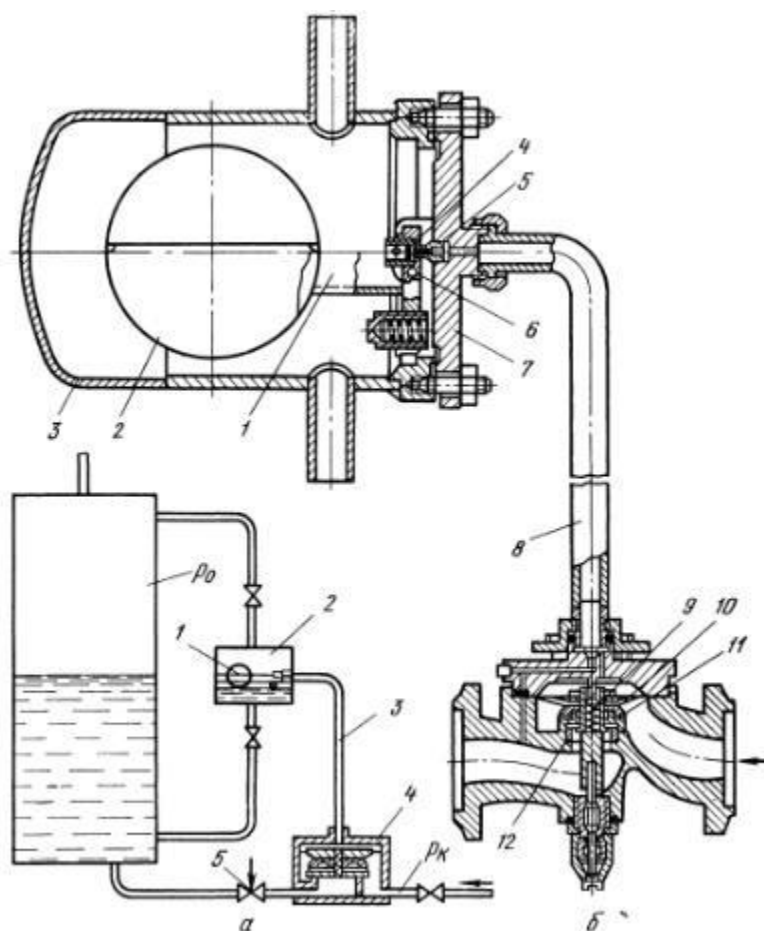
Регулятор состоит из датчика (пилота) 2 и исполнительного устройства 4. Датчик представляет собой поплавковую камеру, которая двумя уравнительными трубками сообщается с контролируемым сосудом.

В камере поплавков 1 с вспомогательным клапаном перекрывает выход из трубки 3. Эта трубка связывает датчик с исполнительным устройством, через нее осуществляется управление работой основного клапана.

Основной клапан устанавливают на линии подачи жидкого хладагента из конденсатора 3 испаритель или другой сосуд. Для увеличения надежности и долговечности клапана следует избегать пропуска жидкости через него с большими

скоростями. Функции дросселирующего устройства выполняет ручной регулирующий вентиль 5, устанавливаемый после клапана регулятора. Дросселирование можно осуществлять и через диафрагму постоянного сечения.

Устройство регулятора приведено на рисунке 5, б. В цилиндрической поплавковой камере 3, имеющей объемную крышку 7, находится поплавок 2, укрепленный на рычаге 1. Последний может вращаться вокруг оси 6. На конец рычага 1 надет вспомогательный резиновый клапан 4, перекрывающий седло 5. Выходной канал датчика соединен с трубкой 8, связывающей датчик с исполнительным устройством.



*а* — принципиальная схема; *б* — устройство

Рисунок 5 - Пилотный регулятор с двухпозиционной характеристикой типа ПРУД

По конструкции исполнительное устройство аналогично электромагнитному вентилю непрямого действия с тем отличием, что вместо вспомогательного клапана, расположенного на сердечнике электромагнита имеется клапан на рычаге поплавка.

Когда контролируемый уровень выше заданного, поплавок поднят, и вспомогательный резиновый клапан 4 перекрывает седло 5. Давления под мембраной 10 исполнительного устройства и над ней сравниваются, вследствие чего происходит перетекание среды через небольшое отверстие в узле клапана 9.

В этом случае основной клапан 11 прижат к седлу 12 полным перепадом между давлениями на входе в исполнительное устройство и на выходе из него. Приток жидкости в сосуд отсутствует.

С понижением уровня поплавков, опускаясь, приоткрывает седло 5, в результате чего полость над мембраной сообщается с системой низкого давления  $p_0$ . В этой полости давление понижается. Появляется равнодействующая сила, стремящаяся поднять основной клапан. При достаточном открытии вспомогательного клапана давление над мембраной падает настолько, что сила, развиваемая мембраной, становится больше силы, прижимающей клапан 11 к седлу. Происходит отрыв клапана от седла. Жидкость быстро заполняет участок трубопровода от клапана до регулирующего вентиля 5 (см. рисунок 5, а). Давление под клапаном возрастает, исчезает сила, действующая на клапан вниз. Поэтому мембрана ускоренно подтягивает клапан вверх и надежно удерживает его в открытом состоянии.

С повышением уровня клапан вновь прикрывается, а затем закрывается полностью. Давления над и под мембраной сравниваются. Под действием собственного веса и возвратной пружины клапан 11 (рисунок 5, б), опускаясь, перекрывает седло. На участке трубопровода до дросселя давление быстро падает до  $p_0$ , в результате чего клапан плотно прижимается к седлу.

Пилотный регулятор приточного типа (рисунок 6) обладает плавной характеристикой и состоит из поплавкового пилотного устройства и поршневого исполнительного устройства.

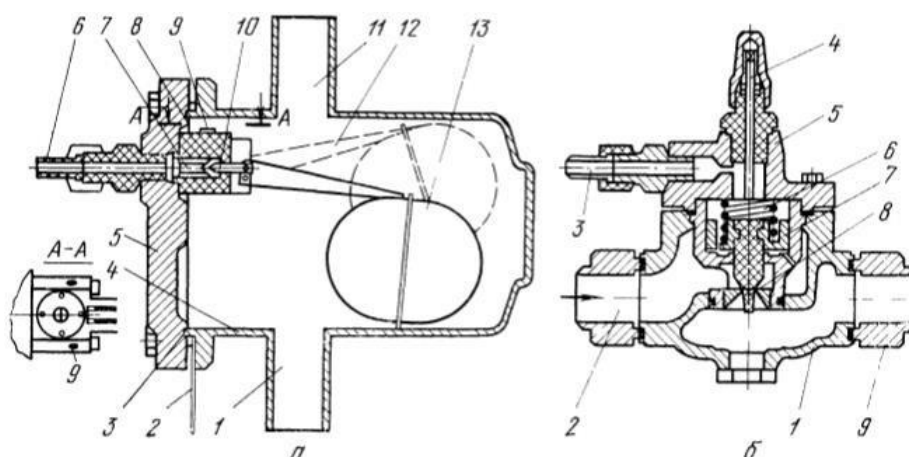
Поплавковое устройство (см. рисунок 6, а) представляет собой камеру 4 с крышкой 5 и патрубками 1 и 11. Крышка герметично соединяется с камерой через фланец 2 и прокладку 3. К крышке подводится трубка 6 от исполнительного устройства. В камере расположен поплавок 13, укрепленный на рычаге 12. При изменении положения поплавок игольчатый клапан 10 изменяет проходное сечение через седло 7. В обвод клапана предусмотрено дополнительное отверстие 5, которое может перекрываться одним из трех дросселей, выполненных в настроечном диске 9. С помощью этого устройства имеется возможность в небольших пределах корректировать неравномерность регулятора уровня.

Исполнительное устройство (см. рисунок 6, б) состоит из поршневого механизма и регулирующего органа. Детали исполнительного устройства смонтированы в корпусе 1, перекрытом крышкой 5 и имеющем входной и выходной патрубки с фланцами 2 и 9. Трубка 3 соединяет исполнительное устройство с пилотным устройством. Регулирующий клапан 8 сочленен с поршнем 7, внутри которого помещена пружина 6. Поршень имеет калиброванное отверстие, через которое жидкость заполняет полость над ним. С помощью винта 4 клапан можно принудительно закрыть.

Пилотное устройство присоединяется к сосуду или аппарату по принципу сообщающегося сосуда. Исполнительное устройство устанавливается на линии подвода жидкого хладагента от конденсатора к испарителю.

Если уровень в аппарате и поплавковой камере низкий, то поплавков, опускаясь, увеличивает проход в седле игольчатого клапана. Его сопротивление уменьшается, в результате чего понижается давление в полости над поршнем. Сила, действующая на поршень снизу вследствие перепада давления под и над поршнем, увеличивается. В результате поршень, преодолевая сопротивление пружины, переходит в более высокое положение, и регулирующий клапан увеличивает расход поступающей жидкости.

На базе такого регулятора с помощью незначительных переделок можно получить регулятор отточного типа.



*а* - поплавковое пилотное устройство; *б* - поршневое исполнительное устройство

Рисунок 6 - Пилотный регулятор с плавной характеристикой

В зависимости от пропускной способности исполнительного устройства пилотные регуляторы могут обеспечивать питание испарителей холодопроизводительностью по аммиаку примерно от 100 до 7000 кВт.

### 3.1.3 Регуляторы уровня непрямого действия с подводом внешней энергии

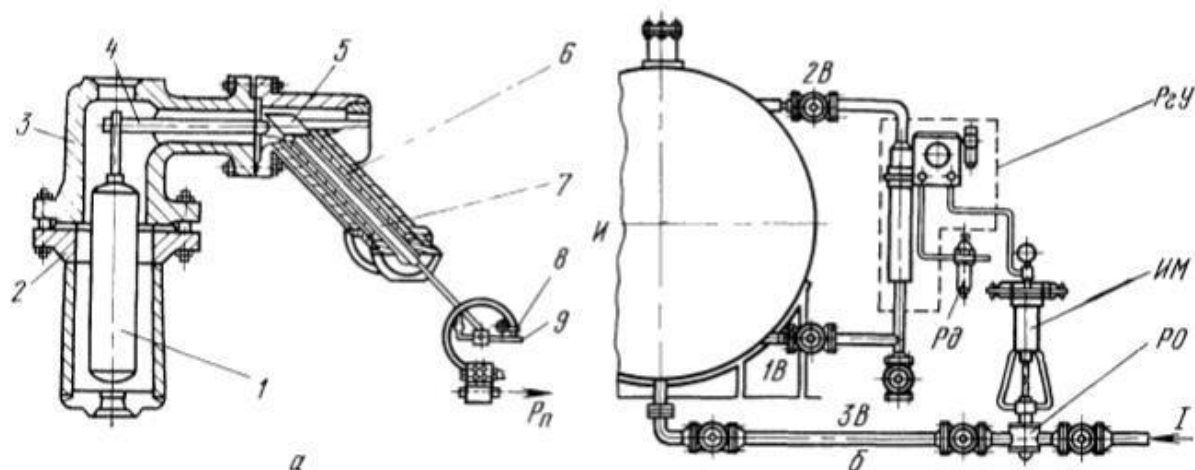
Регуляторы этого класса отличаются от регуляторов уровня прямого и непрямого действия без подвода внешней энергии тем, что для перестановки регулирующего органа используется внешняя энергия. Принцип действия и устройство рассмотрим на примере пневматического регулятора уровня. Регулирующий орган, установленный на оттоке или на притоке в сосуд, переставляется пневматическим исполнительным механизмом.

Пневматические регуляторы уровня применяют в системах питания кожухотрубных испарителей большой производительности, а также в тех случаях, когда для удовлетворения специальных требований, например по обеспечению взрывобезопасности, использование электрических приборов нежелательно.

Чувствительным элементом первичного преобразователя (рисунок 7, *а*) является тонущий буюк 1, размещенный в выносной камере. Камера 2 с крышкой 3 уравниваемыми линиями связывается с контролируемым сосудом. В зависимости от уровня жидкости в камере изменяется вес буйка. Рычаг 4, на котором подвешен буюк, незначительно перемещается. Через основание 5 и торсионную трубку 6 перемещения передаются стержню 7 и далее на подвижный элемент пневмосистемы - заслонку 8, которая работает совместно с соплом 9.

Пневмосистема преобразует механическое перемещение в изменения рабочего давления  $p_n$  воздуха, управляющего пневматическим исполнительным механизмом. Схема присоединения пневматического регулятора для питания испарителя *И* представлена на рисунке 7, *б*.

Регулятор  $P_2У$  присоединен к испарителю через вентили  $1В$  и  $2В$ . Вентиль  $3В$  используют для проверки регулятора и продувки камеры.



*а* - схема первичного преобразователя; *б* - схема присоединения

Рисунок 7 - Пневматический регулятор уровня

Питание пневмосистемы сжатым воздухом осуществляется через редуктор  $PД$ .

При изменениях уровня жидкости пневматический сигнал передается в исполнительный механизм  $ИМ$ , с помощью которого переставляется клапан регулирующего органа  $РВ$ .

В состав регулятора входят измерительное устройство и контрольные манометры, показывающие давление питающего воздуха и давление, которое подводится к исполнительному механизму.

Измерительное устройство указывает уровень по шкале, отградуированной в процентах. Кроме того, к регулятору можно присоединить вторичный пневматический прибор для дистанционного измерения уровня. В приборе предусмотрено специальное устройство для коррекции показаний в зависимости от плотности жидкости.

Регулятор применяют для сред, не агрессивных к стали. Его устанавливают в помещении или на открытом воздухе.

### 3.2 Контрольные вопросы

1 Почему измерение уровня жидкостей играет важную роль при автоматизации технологических процессов во многих отраслях промышленности?

2 Какова классификация уровнемеров, укажите особенность каждого из указанного типа приборов?

3 Как происходит измерение уровня жидкости указательными стеклами?

4 Перечислите наиболее распространенные в настоящее время методы измерения уровня жидкостей и сыпучих тел;

5 В чем особенность пневмометрического метода измерения уровня?

6 Дайте характеристику поплавковым уровнемерам;

7 Дайте характеристику буйковым уровнемерам;

8 Дайте характеристику емкостным уровнемерам;

- 9 Дайте характеристику радиоизотопным уровнемерам;
- 10 Какие приборы применяют в холодильной технике для регулирования и сигнализации уровня?
- 11 Опишите устройство и принцип действия реле уровня;
- 12 Опишите устройство и принцип действия регуляторов уровня прямого и непрямого действия без подвода внешней энергии;
- 13 Опишите устройство и принцип действия пилотного регулятора с плавной характеристикой;
- 14 Опишите устройство и принцип действия регуляторов уровня непрямого действия с подводом внешней энергии.

## **Практическое занятие 4. Изучение конструкции и принципа действия приборов контроля и регулирования расхода**

*Цель.* Изучить принцип действия, конструкции и область применения приборов для измерения расхода, а также получить навыки по расчету сужающих устройств.

### **4.1 Теоретические сведения**

Расход жидкостей, газов и пара является одним из важных показателей многих технологических процессов. Отметим некоторые особенности наиболее распространенных методов измерения расхода.

Одним из наиболее распространенных и изученных является способ измерения расхода жидкостей, газов и пара в трубопроводах по перепаду давления в сужающем устройстве. Сужающее устройство выполняет функции первичного преобразователя, устанавливается в трубопроводе и создает в нем местное сужение, вследствие чего при протекании вещества повышается скорость в суженном сечении по сравнению со скоростью потока до сужения. Увеличение скорости, а следовательно, и кинетической энергии вызывает уменьшение потенциальной энергии потока в суженном сечении. Соответственно статическое давление в суженном сечении будет меньше, чем в сечении до сужающего устройства. Таким образом, при протекании вещества через сужающее устройство создается перепад давления  $\Delta p$  (см. рисунок 1), зависящий от скорости потока и, следовательно, расхода жидкости. Отсюда следует, что перепад давления, создаваемый сужающим устройством, может служить мерой расхода вещества, протекающего в трубопроводе, а численное значение расхода вещества может быть определено по перепаду давления  $\Delta p$ , измеренному дифманометром.

В качестве сужающих устройств для измерения расхода жидкостей, газов и пара широко применяют стандартные диафрагмы, сопла и сопла Вентури. В особых случаях измерения расхода находят также применение не нормализованные типы сужающих устройств.

Диафрагма показана на рисунке 1, *a* и представляет собой тонкий диск с отверстием круглого сечения, центр которого лежит на оси трубы. Сужение потока начинается до диафрагмы, и на некотором расстоянии за диафрагмой поток достигает минимального сечения, далее поток постепенно расширяется до полного сечения трубопровода. На рисунке 1, *a* сплошной линией представлена кривая, характеризующая распределение давлений вдоль стенки трубопровода; кривая, изображенная штрихпунктирной линией, характеризует распределение давлений по оси трубопровода. Как видно, давление за диафрагмой полностью не восстанавливается.

При протекании вещества через диафрагму за ней в углах образуется мертвая зона, в которой вследствие разности давлений возникает обратное движение жидкости или так называемый вторичный поток. Вследствие вязкости жидкости струйки основного и вторичного потоков, двигаясь в противоположных направлениях, свертываются в виде вихрей. На вихреобразовании за диафрагмой затрачивается значительная часть энергии, а следовательно, имеет место и значительная потеря давления. Изменение направления струек перед диафрагмой и сжатие струи после диафрагмы имеют незначительное влияние.

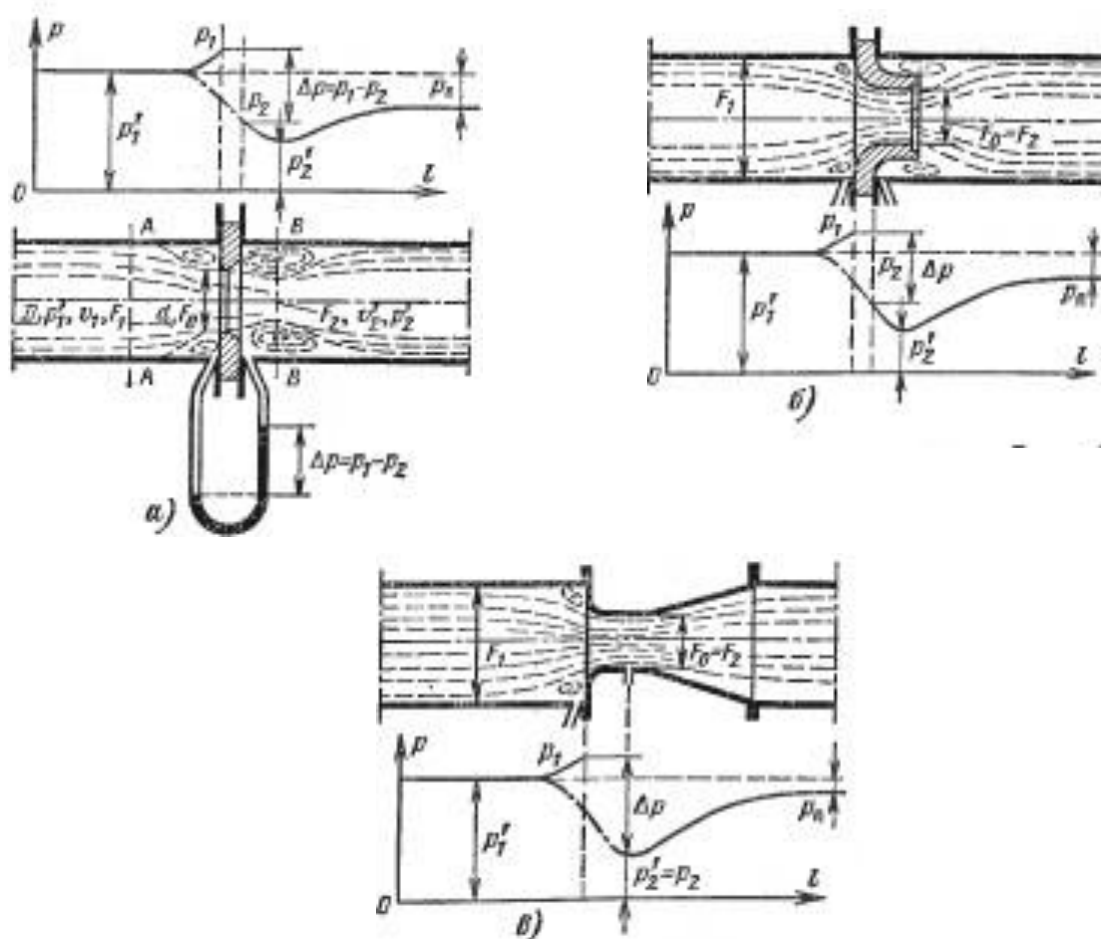


Рисунок 1 - Характер потока и распределение статического давления при установке в трубопроводе диафрагмы (а), сопла (б) и сопла Вентури (в)

Как видно из рисунка 1, а, отбор давлений  $p_1$  и  $p_2$  осуществляется с помощью двух отдельных отверстий, расположенных непосредственно до и после диска диафрагмы в углах, образуемых плоскостью диафрагмы и внутренней поверхностью трубопровода. Другие способы отбора давлений  $p_1$  и  $p_2$  описаны ниже.

Сопло (см. рисунок 1, б) выполнено в виде насадки с круглым концентрическим отверстием, имеющим плавно сужающуюся часть на входе и развитую цилиндрическую часть на выходе. Профиль сопла обеспечивает достаточно полное сжатие струи, и площадь цилиндрического отверстия сопла может быть принята равной минимальному сечению струи ( $F_0 = F_2$ ). Вихреобразование за соплом вызывает меньшую потерю энергии, чем у диафрагмы. Кривые изменения давления вдоль стенки и по оси трубопровода (пунктирная линия) имеют тот же характер, что и для диафрагмы, но остаточная потеря давления  $p_{\text{п}}$  для сопла немного меньше, чем для диафрагмы. Однако следует отметить, что при равных перепадах давления для одного и того же расхода площадь проходного отверстия  $F_0$  для диафрагмы больше, чем для сопла, поэтому потеря давления в этом случае практически одинакова. Отбор давлений  $p_1$  и  $p_2$  до и после сопла осуществляется так же, как и у диафрагмы.

На рисунке 1, в представлено сопло Вентури, которое состоит из цилиндрического входного участка, плавно сужающейся части, переходящей в короткий цилиндрический участок, и из расширяющейся конической части - диффузора. В этой форме сужающего

устройства главным образом благодаря наличию выходного диффузора потеря давления значительно меньше, чем у диафрагм и сопла (см. рисунок 1, в). Отбор давлений  $p_1$  и  $p_2$  осуществляется с помощью двух кольцевых камер, каждая из которых соединяется с внутренней полости сопла Вентури группой равномерно расположенных по окружности отверстий.

Принцип измерения расхода вещества по перепаду давления, создаваемому сужающим устройством, и основные уравнения одинаковы для всех типов сужающих устройств, различны лишь некоторые коэффициенты в этих уравнениях, определяемые опытным путем.

#### 4.1.1 Методические указания по измерению расхода жидкостей, газов и пара расходомерами с сужающим устройством

Стандартные сужающие устройства могут применяться в комплекте с дифманометрами для измерения расхода и количества жидкостей, газов и пара в круглых горизонтальных, вертикальных и наклонных трубопроводах диаметром не менее 50 мм на основании, расчета без индивидуальной градуировки.

Точность измерения расхода вещества по перепаду давления в сужающем устройстве зависит не только от типа выбранного сужающего устройства и дифманометра, а в равной мере и от соблюдения ряда условий, рассматриваемых ниже.

Необходимо, чтобы измеряемое вещество заполняло все поперечное сечение трубопровода перед сужающим устройством и за ним. Пар должен быть перегретым. Поток в трубопроводе является или может быть практически принят установившимся. Фазовое состояние вещества не изменяется при прохождении через сужающее устройство (например, растворенные в жидкости газы не выделяются, водяной пар остается перегретым, жидкость не испаряется).

Конденсат и пыль, выделяющиеся при измерении расхода газа или пара, а также газы или осадки, выделяющиеся при измерении расхода жидкости, не скапливаются в трубопроводе вблизи сужающего устройства.

При измерении расхода вещества, вызывающего отложения на сужающем устройстве, обеспечена возможность периодической очистки продувки, промывки; сужающего устройства, применение стандартных сужающих устройств для измерения расхода коллоидальных растворов допустимо в тех случаях, когда раствор по степени дисперсности и физическим свойствам мало отличается от однофазной жидкости.

При измерении расхода агрессивных жидкостей или газов, а также нефтепродуктов и активных сред необходимо дифманометры устанавливать со специальными разделительными сосудами. Для измерения расхода активных сред необходимо применять разделительные сосуды с металлическими разделительными перегородками.

Место установки дифманометров должно обеспечивать удобство обслуживания и наблюдения за их работой; дифманометры должны быть установлены по отвесу или уровню на прочных основаниях в местах, которые не подвергаются вибрациям и ударным сотрясениям (при наличии вибраций необходимо применить амортизирующие приспособления). Вторичные приборы дифманометров, как правило, устанавливаются на щитах.

Если измерение расхода ведется в условиях, при которых параметры измеряемой среды отличаются от параметров, принятых для расчета сужающего устройства и шкалы

расходомера, то для получения действительного значения расхода необходимо в показания прибора ввести соответствующую поправку или по показаниям прибора произвести пересчет.

Перепад давления  $\Delta p$ , образующийся в комбинированной напорной трубке, равен динамическому напору. Скорость  $U$ , соответствующая этому перепаду, определяется из уравнения:

$$U = k_T \frac{\sqrt{2\Delta p}}{\rho} \quad (4.1)$$

где  $k_T$  - коэффициент трубки (для правильно изготовленных трубок близок к единице).

Напорные трубки измеряют скорость в конкретной точке сечения потока. Поэтому для определения расхода необходимо знать соотношение между местной скоростью  $U$  и средней скоростью  $U_c$ , которое определяется распределением скоростей по сечению трубопровода. При осесимметричном потоке распределение скоростей определяется числом Рейнольдса  $Re$  и степенью шероховатости трубы. Установлено, что в широком диапазоне чисел  $Re$  от  $4 \cdot 10^3$  до  $3 \cdot 10^6$ ,  $\frac{U}{U_c} = 1 \pm 0,005$  на расстоянии  $0,762 \cdot R$  от центра трубы. При ламинарном режиме это отношение имеет место на расстоянии  $0,707 \cdot R$  от центра трубы, где  $R$  - радиус трубы.

В настоящее время наиболее распространенным в промышленности методом является измерение расхода с помощью сужающих устройств.

Взаимосвязь между объемным  $Q_0$  или массовым  $Q_m$  расходом и перепадом  $\Delta p$  на сужающем устройстве определяется уравнениями расхода:

$$\begin{aligned} Q_0 &= \alpha \cdot \varepsilon \cdot F_0 \sqrt{2\Delta p}; \\ Q_m &= \alpha \cdot \varepsilon \cdot F_0 \sqrt{2\rho \cdot \Delta p} \end{aligned} \quad (4.2)$$

где  $F_0$  - площадь отверстия сужающего устройства,  $m^2$ ;

$\rho$  - плотность измеряемой среды перед сужающим устройством,  $kg/m^3$ ;

$\alpha$  - коэффициент расхода;

$\varepsilon$  - поправочный множитель на расширение измеряемой среды.

Коэффициент расхода  $\alpha$  зависит от относительной площади (модуля) сужающего устройства  $m$  и числа Рейнольдса  $Re$ . При  $Re > Re_{гр}$ ,  $\alpha$  слабо зависит от  $Re$  и в основном определяется значением  $m$ . Действительный коэффициент расхода  $\alpha$  определяется через исходный  $\alpha_H$  по формуле (для промышленных расходомеров):

$$\alpha = \alpha_H \cdot k_{ш} \cdot k_{п} \quad (4.3)$$

где  $k_{ш}$  - поправочный множитель на шероховатость трубопровода;

$k_{п}$  - поправочный множитель на притупление входной кромки диафрагмы (для сопел  $k_{п} = 0$ ).

При использовании этого метода измерения часто имеют место погрешности, вызванные несоответствием расчетных и действительных значений параметров в уравнениях расхода. Например, при отклонении температуры среды  $t$  от расчетной  $t_p$  изменяется плотность среды, что вызывает изменение показаний расходомера. Для сухого газа новое значение плотности  $\rho$  определяется через плотность  $\rho_H$  при нормальных условиях по формуле

$$\rho = \rho_H \frac{p T_H}{p_H \cdot T \cdot k} \quad (4.4)$$

где  $p$  и  $T$  - действительное давление и абсолютная температура среды;

$p_H$  и  $T_H$  - параметры среды при нормальных условиях;

$k$  - коэффициент сжимаемой среды.

Для жидкости плотность  $\rho$  при температуре  $t$  может вычисляться по формуле:

$$\rho = \rho_p [1 - \beta(t - t_p)], \quad (4.5)$$

где  $\rho_p$  - плотность жидкости при расчетной температуре  $t_p$ ;

$\beta$  - средний коэффициент объемного теплового расширения жидкости в интервале температур от  $t_p$  до  $t$ .

Средняя квадратическая относительная погрешность измерения расхода показывающим дифманометром определяется по формуле:

$$\sigma_Q = \sqrt{\sigma_\alpha^2 + \sigma_\varepsilon^2 + \sigma_{k_{Re}}^2 + \frac{\sigma_p^2}{4} + \frac{\sigma_{\sqrt{\Delta P}}^2}{\sqrt{\Delta P}}}. \quad (4.6)$$

Электромагнитные расходомеры применимы для измерения расхода электропроводящих сред. Поэтому они не могут быть использованы для измерения расхода газов, нефтепродуктов, масел и других непроводящих сред. Конструкция измерительного преобразователя расходомера практически не изменяет форму и сечение трубопровода и поэтому может широко использоваться для измерения загрязненных жидкостей и пульп. Это один из немногих методов, позволяющих измерять расходы жидких металлов.

Ультразвуковые расходомеры позволяют измерять расход без непосредственного контакта с измеряемой средой. Этот метод пока применяется только для измерения расхода жидкостей. Схема ультразвукового расходомера достаточно сложна. Поэтому они пока не нашли широкого применения в промышленности.

Некоторое распространение получили тепловые расходомеры (калориметрические, термоанемометрические), работа которых основана на зависимости теплообмена между нагреваемым элементом и потоком от скорости (расхода) измеряемой среды.

## 4.2 Задачи

4.2.1 По трубке диаметром  $D$  движется поток жидкости со средней скоростью  $U$ . Определите массовый расход жидкости, если ее плотность  $\rho = 990 \text{ кг/м}^3$ , коэффициент трубки  $k_T = 0,97$ . Данные для решения задачи принять по таблице 4.2.1.

Таблица 4.2.1 - Данные для решения задачи

| Предпоследняя цифра шифра | $D$ , мм | Последняя цифра шифра | $U$ , м/с |
|---------------------------|----------|-----------------------|-----------|
| 1                         | 100      | 1                     | 1,5       |
| 2                         | 110      | 2                     | 1,6       |
| 3                         | 120      | 3                     | 1,7       |
| 4                         | 130      | 4                     | 1,8       |
| 5                         | 140      | 5                     | 1,9       |
| 6                         | 100      | 6                     | 1,5       |
| 7                         | 110      | 7                     | 1,6       |
| 8                         | 120      | 8                     | 1,7       |
| 9                         | 130      | 9                     | 1,8       |
| 0                         | 140      | 0                     | 1,9       |

4.2.2 Определите перепад давления, создаваемый напорными трубками, если поток воды движется со средней скоростью  $U$ , плотность воды  $\rho = 985 \text{ кг/м}^3$ , коэффициент трубки  $k_T$ . Данные для решения задачи принять по таблице 4.2.2.

Таблица 4.2.2 - Данные для решения задачи

| Предпоследняя цифра шифра | $k_T$ | Последняя цифра шифра | $U$ , м/с |
|---------------------------|-------|-----------------------|-----------|
| 1                         | 0,97  | 1                     | 0,1       |
| 2                         | 0,98  | 2                     | 0,2       |
| 3                         | 0,99  | 3                     | 0,3       |
| 4                         | 0,97  | 4                     | 0,4       |
| 5                         | 0,98  | 5                     | 0,5       |
| 6                         | 0,99  | 6                     | 0,1       |
| 7                         | 0,97  | 7                     | 0,2       |
| 8                         | 0,98  | 8                     | 0,3       |
| 9                         | 0,99  | 9                     | 0,4       |
| 0                         | 0,97  | 0                     | 0,5       |

### 4.3 Контрольные вопросы

- 1 Как измеряется расход жидкостей, газов и пара?
- 2 В особенность измеряется вещества в сужающем устройстве?
- 3 Какие устройства применяются в качестве сужающих устройств для измерения расхода жидкостей, газов и пара?
- 4 В чем особенность измерения расхода вещества с помощью диафрагмы?
- 5 В чем особенность измерения расхода вещества с помощью сопла?
- 6 В чем особенность измерения расхода вещества с помощью сопла Вентури?
- 7 Какими методическими указаниями следует пользоваться при измерению расхода жидкостей, газов и пара расходомерами с сужающим устройством?

## Практическое занятие 5. Изучение устройства и настройка ТРВ.

*Цель.* Построение статической характеристики ТРВ.

### 5.1 Теоретические сведения

Простейшая холодильная установка состоит из следующих основных элементов: компрессор (1), конденсатор (2) и испаритель (3). Для того, чтобы установка могла поддерживать заданную температуру воздуха в холодильнике, ее необходимо оснастить настраиваемыми регулируемыми вентилями (4) и (5), которые способны учитывать изменение тепловой нагрузки на испаритель и конденсатор.

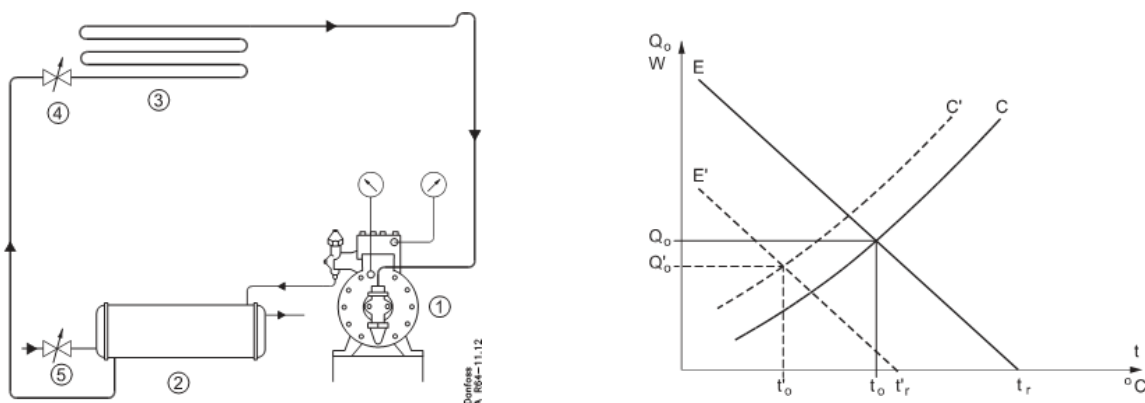


Рисунок 1 - Холодильная установка с ручным регулированием производительности

Например, при помощи вентилей с фиксированной настройкой установка не в состоянии поддерживать постоянную температуру в холодильнике в зимних и летних условиях при непрерывно работающем компрессоре. Это легко можно показать графически (рисунок 1). Сплошной линией показана производительность установки в летний период времени, а пунктирной – в зимний (например, зимой при температуре конденсации  $+25^\circ\text{C}$ , а летом при температуре конденсации  $+35^\circ\text{C}$ ).

Кривые  $C$  представляют собой производительность компрессора, которая растет с увеличением температуры кипения  $t_0$ . Кривые  $E$  представляют собой производительность испарителя, которая растет с увеличением разности  $t_r - t_0$  температуры в холодильнике ( $t_r$ ) и температуры кипения ( $t_0$ ). Там, где кривые  $C$  пересекаются с кривыми  $E$  (при зимней и летней эксплуатации), производительности компрессора, конденсатора и испарителя равны.

Как видно из рисунка 1, когда потребность в охлаждении падает от  $Q_0$  летом до  $Q'_0$  зимой, температура воздуха в холодильнике снижается от  $t_r$  до  $t'_r$ . Для поддержания заданной температуры в любых условиях эксплуатации производительность компрессора, конденсатора и испарителя должна регулироваться, например, изменением времени работы компрессора, изменением расхода охлаждающей воды через конденсатор или изменением расхода хладагента через испаритель.

В холодильной установке (см. рисунок 2) конденсатор, охлаждаемый водой, заменен конденсатором с воздушным охлаждением. Конденсаторы с воздушным охлаждением обычно используются там, где отсутствует охлаждающая вода или где использование охлаждающей воды запрещено.

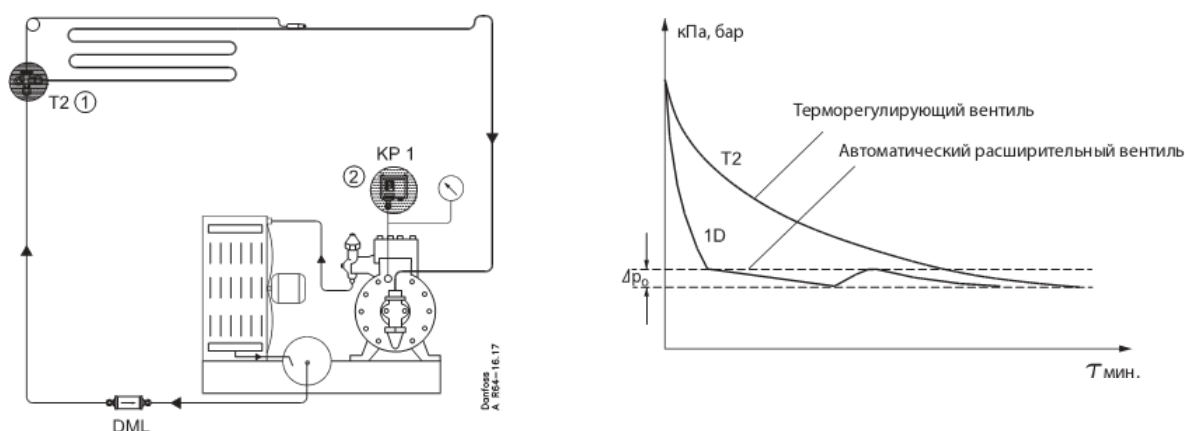


Рисунок 2 - Холодильная установка с терморегулирующим вентилем и конденсатором с воздушным охлаждением

Замена вентилей с ручным управлением перед испарителем на терморегулирующий вентиль (поз. 1) дает возможность подавать в испаритель такое количество хладагента, которое необходимо для компенсации тепловой нагрузки на испаритель и обеспечения постоянного перегрева хладагента на выходе испарителя.

При этом, естественно, предполагается, что размер выбранного терморегулирующего вентилей соответствует производительности испарителя. Решающим фактором здесь является то, что в условиях максимальной тепловой нагрузки на испаритель терморегулирующий вентиль должен точно подать количество хладагента, которое может испарить испаритель.

Кроме того, настройка перегрева на терморегулирующем вентиле должна соответствовать производительности испарителя.

Перегрев здесь понимается как разность температуры хладагента в испарителе и температуры кипения хладагента при заданном давлении и полностью испарившемся хладагенте. Т.е. перегрев определяется как:

$$t_1 - p_s = ^\circ\text{C}, \quad (5.1)$$

где  $t_1$  — это температура, измеренная в точке, где установлен датчик температуры терморегулирующего вентилей (термобаллон),

$p_s$  — давление хладагента, измеренное в этой точке. (Давление затем переводится в соответствующую температуру).

### 5.1.1 Терморегулирующий вентиль

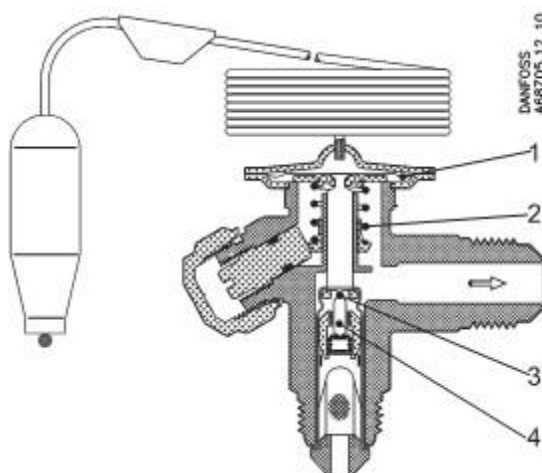


Рисунок 3 - Терморегулирующий вентиль типа T2

Терморегулирующий вентиль типа T2 (см. рисунок 3), термобаллон которого установлен сразу за испарителем, открывается при увеличении перегрева. При увеличении температуры термобаллона увеличивается давление над мембраной (1), а при увеличении температуры кипения увеличивается давление под мембраной.

Перепад давления на мембране, который пропорционален перегреву хладагента, проявляется как сила, которая пытается открыть вентиль, преодолевая силу сжатия пружины (2).

Когда перепад давления, связанный с перегревом, превысит силу сопротивления пружины, вентиль откроется.

Клапанный узел, состоящий из посадочного седла (3) и клапана (4), можно заменять. Клапанный узел имеет восемь типоразмеров, удовлетворяющих различным требованиям по производительности терморегулирующего вентиля.

### 5.1.2 Терморегулирующий вентиль с распределителем жидкости

Распределитель жидкости типа RD обеспечивает равномерное распределение жидкого хладагента по параллельным секциям испарительного теплообменника. Распределитель устанавливается или непосредственно на терморегулирующем вентиле, как показано на рисунке 4, или на линии, идущей от ТРВ.

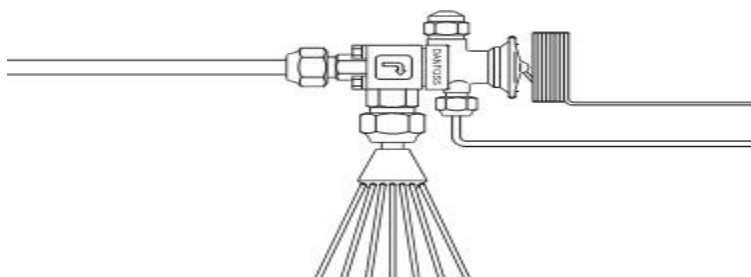


Рисунок 3 - Терморегулирующий вентиль с распределителем жидкости

Распределитель жидкости типа RD обеспечивает равномерное распределение жидкого хладагента по параллельным секциям испарительного теплообменника. Распределитель устанавливается или непосредственно на терморегулирующем вентиле, как показано на рисунке 4, или на линии, идущей от ТРВ.

Распределить следует устанавливать так, чтобы поток жидкости, проходящий через трубки распределителя, всегда имел вертикальную ориентацию. Такое расположение распределителя сводит к минимуму влияние силы тяжести на движение жидкости. Все трубки распределителя должны иметь одинаковую длину. Испарители с большим перепадом давления необходимо использовать совместно с терморегулирующими вентилями, имеющими внешнее уравнивание. Испарители с распределителями жидкости имеют большой перепад давления, следовательно, ТРВ всегда должны иметь внешнюю линию уравнивания.

### 5.1.3 Принцип действия терморегулирующего вентиля

Степень открытия терморегулирующего вентиля зависит от разности между температурой термобаллона  $t_b$  и температурой кипения  $t_0$ .

Вентиль открывается при повышении разности,  $t_b - t_0 = \Delta t$ , т.е. при увеличении перегрева хладагента степень открытия ТРВ увеличивается (см. рисунок 4).

Сплошная линия  $p_0$  и пунктирная линия  $p_b$  представляют собой давление паров хладагента и наполнителя термобаллона, соответственно. Штрихпунктирная линия  $p_0 + p_s$  представляет собой давление паров хладагента и силы сопротивления пружины  $p_s$ , с заводской настройкой.

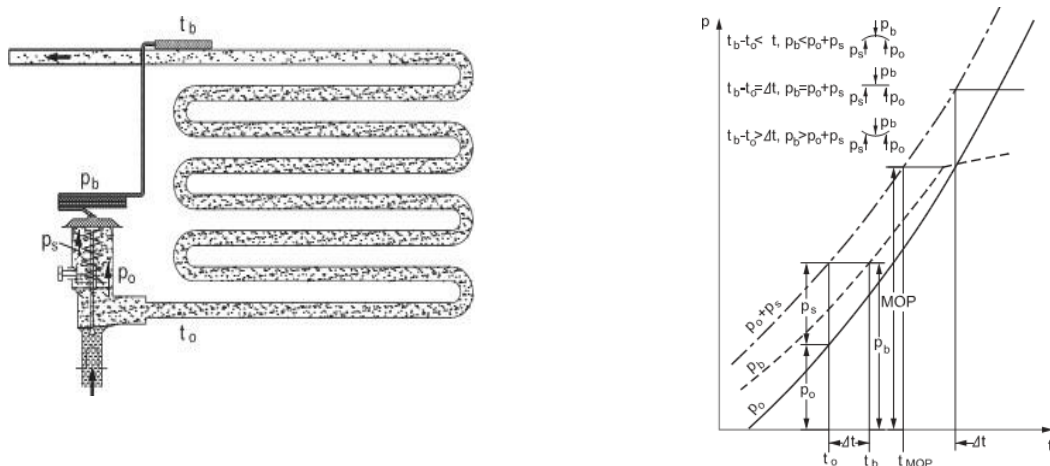


Рисунок 4 - Принцип действия терморегулирующего вентиля

При данной температуре кипения  $t_0$  на нижнюю поверхность мембраны действует давление  $p_0 + p_s$ , которое пытается закрыть вентиль.

Давление  $p_b$  действует на верхнюю поверхность мембраны и пытается открыть вентиль.

На рисунке показано, что давления  $p_0 + p_s$  и  $p_b$  соответствующие температуре кипения  $t_0$  и температуре термобаллона  $t_b$  равны.

Практически, разность  $t_b - t_0$ , представляющая собой статический перегрев, не изменяется во всем диапазоне работы ТРВ от  $t'_0$  до  $t'_0$ .

Т.е. можно сказать, что, независимо от температуры кипения, изменяющейся в пределах рабочего диапазона, терморегулирующий клапан будет регулировать расход хладагента таким образом, что перегрев хладагента за испарителем будет поддерживаться на уровне, задаваемом силой сопротивления пружины  $p_s$ .

Если разность температуры термобаллона  $t_b$  и температуры кипения  $t_0$  будет меньше статического перегрева  $\Delta t$ , клапан закроется ( $t_b - t_0 < \Delta t$ ;  $p_b < p_0 + p_s$ ).

Если разность температуры термобаллона  $t_b$  и температуры кипения  $t_0$  будет больше статического перегрева  $\Delta t$ , клапан откроется ( $t_b - t_0 > \Delta t$ ;  $p_b > p_0 + p_s$ ).

Если разность температуры  $t_b$  и температуры кипения  $t_0$  будет равна статическому перегреву  $\Delta t$ , клапан клапана будет в открытом или закрытом положении ( $t_b - t_0 = \Delta t$ ;  $p_b = p_0 + p_s$ ).

## 5.2 Контрольные вопросы

- 1 Опишите устройство и принцип действия простейшей холодильной установки;
- 2 Опишите устройство и принцип действия простейшей холодильной установки с ручным регулированием производительности;
- 3 Опишите устройство и принцип действия простейшей холодильной установки с терморегулирующим клапаном и конденсатором с воздушным охлаждением;
- 4 Для чего служит терморегулирующий клапан?
- 5 Опишите устройство терморегулирующего клапана с распределителем жидкости;
- 6 Опишите устройство терморегулирующего клапана с распределителем жидкости;
- 7 Опишите принцип действия терморегулирующего клапана.