

**Министерство образования Республики Беларусь**

**Учреждение образования  
«Гомельский государственный технический  
университет имени П. О. Сухого»**

**Кафедра «Нефтегазозаработка и гидропневмоавтоматика»**

**Т. В. Атвиновская**

# **АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ**

**ПРАКТИКУМ**

**по одноименной дисциплине для студентов  
специальности 1-51 02 02 «Разработка  
и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений»  
дневной и заочной форм обучения**

**Гомель 2020**

УДК 622.276(075.8)  
ББК 33.36я73  
А92

*Рекомендовано научно-методическим советом  
машиностроительного факультета ГГТУ им. П. О. Сухого  
(протокол № 3 от 02.12.2019 г.)*

Рецензент: ведущий инженер-технолог отдела перспективного развития БелНИПИнефть  
канд. техн. наук *И. В. Лымарь*

**Атвиновская, Т. В.**  
А92 Автоматизация производственных процессов : практикум по одной дисциплине для студентов специальности 1-51 02 02 «Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений» днев. и заоч. форм обучения / Т. В. Атвиновская. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2020. – 68 с. – Систем. требования: PC не ниже Intel Celeron 300 МГц ; 32 Mb RAM ; свободное место на HDD 16 Mb ; Windows 98 и выше ; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа: <https://elib.gstu.by>. – Загл. с титул. экрана.

Изложены основные сведения об автоматизации в нефтяной промышленности.  
Для студентов специальности 1-51 02 02 «Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений» дневной и заочной форм обучения.

УДК 622.276(075.8)  
ББК 33.36я73

© Учреждение образования «Гомельский  
государственный технический университет  
имени П. О. Сухого», 2020

## ВВЕДЕНИЕ

Рабочая программа дисциплины «Автоматизация производственных процессов» предназначена для реализации государственных требований к минимуму содержания и уровню подготовки студентов по специальности 1-51 02 02 «Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений» и является единой для всех форм обучения.

Учебная дисциплина «Автоматизация производственных процессов» является специальной, устанавливающей базовые знания для усвоения других дисциплин и получения практических навыков и умений при работе со средствами автоматизации.

Изучение дисциплины основывается на знаниях, полученных студентами при изучении дисциплин: «Физика», «Математика», «Информатика», «Электротехника и электроника», «Гидравлика», «Техническая механика», «Термодинамика».

Полученные знания и умения по дисциплине являются необходимыми для изучения дисциплин: «Эксплуатация нефтяных и газовых месторождений», «Сбор и подготовка скважинной продукции», «Нефтегазопромысловое оборудование», «Электрооборудование для нефтегазопромыслов».

Программой дисциплины предусматривается изучение конструкции, принципа действия, применения средств измерений и автоматизации, основ теории автоматического регулирования, автоматизации производственных процессов добычи, подготовки газа, газоконденсата, нефти, структуры, обеспечения и режимов работы АСУ ТП. Материал программы необходимо систематически пополнять о новых средствах измерений и автоматизации, о достижениях в области автоматизации производства.

Цель методического указания – оказать помощь студентам в изучении теоретического курса дисциплины. По учебному плану изучение данной дисциплины предусматривает проведение обзорных лекций и лабораторных работ. Большая часть теоретического материала подлежит самостоятельному изучению студентами, и в качестве одной из форм самостоятельной работы студентов предусмотрено выполнение контрольной работы, включающей задания практического характера и тестирование.

Лабораторные работы предназначены для углубленного изучения теоретического материала и получения практических навыков и умения при работе со средствами измерения и автоматизации.

В качестве итогового контроля знаний предусматривается зачет.

В результате изучения дисциплины студент должен:

*знать:*

- конструкцию, принцип действия и применение средств измерений и автоматизации;
- назначение и функции каждого элемента в системе автоматического регулирования;
- типовые схемы автоматизации технологических процессов;
- использование ЭВМ в АСУ ТП.

*уметь:*

- выбирать по заданным условиям, справочной литературе, каталогам средства измерений и автоматизации;
- работать с приборами и производить основные технические измерения;
- составлять и читать функциональные схемы автоматизации.

## **Лабораторная работа 1**

### **«Способы измерения температуры»**

Цель занятия: изучение способов измерения температуры в нефтяной промышленности.

#### **1. Теоретическая часть**

Температурный режим газового пласта, скважин, промысловых и магистральных газопроводов является одной из важнейших характеристик, существенно влияющих на эксплуатацию этих объектов.

Особое значение температурного режима скважин возникло в связи с открытием и дальнейшей разработкой крупных залежей природного газа и газоконденсата.

Низкие температуры и высокие давления в условиях насыщения газа влагой приводят к образованию газовых кристаллогидратов и льда в скважинах и наземных сооружениях. Эти образования закупоривают проходное сечение и нарушают эксплуатацию объектов вплоть до прекращения подачи газа.

Высокие температуры, характерные для ряда районов, также осложняют эксплуатацию подземного и наземного газового оборудования. Так с повышением температуры происходит удлинение обсадных труб с образованием гофр (складок), что приводит к их разрыву. Может произойти разрыв промысловых газопроводов в тех случаях, когда после компрессорных станций газ не охлаждается.

На температуру газа в скважине и газопроводе влияют:

- температура пласта и вышележащих пород;
- условия эксплуатации скважины и газопроводов (диаметр и конструкция скважины, дебит газа, депрессия на пласт);
- температура окружающего воздуха.

Существуют следующие основные виды термометров, применяемые в нефтяной промышленности:

- термометры расширения;
- манометрические термометры;
- термоэлектрические преобразователи (термопара);
- термопреобразователи сопротивления

## Основные виды термометров

| Используемый физический эффект         | Наименование устройства                                     | Пределы измерения температуры, °С |         |
|--|---|-----------------------------------|---------|
|  |   | Нижний                            | Верхний |
| Тепловое расширение                    | Жидкостные термометры                                       | -190                              | 600     |
|  | Деформационные термометры                                   | -150                              | 700     |
| Изменение давления                     | Манометрические термометры                                  | -160                              | 60      |
| Изменение электрического сопротивления | Термометры сопротивления                                    | -200                              | 900     |
| Термоэлектрические эффекты             | Термоэлектрические термометры (термопары) стандартизованные | -50                               | 1600    |
|  | Термоэлектрические термометры (термопары) специальные       | 1300                              | 2500    |
| Тепловое излучение                     | Оптические пирометры  | 700                               | 6000    |
|  | Радиационные пирометры                                      | 20                                | 3000    |
|  | Фотоэлектрические пирометры                                 | 600                               | 4000    |
|  | Цветовые пирометры  | 1400                              | 2800    |

**Термометры расширения** действуют на основании способности жидкости изменять свой объем, а твердых тел – размер при изменении температуры.

Жидкостный термометр расширения состоит из резервуара, заполненного жидкостью (ртуть, спирт), капиллярной трубки и шкалы. Объем жидкости в зависимости от температуры определяется по формуле

$$V = V_0 \cdot (1 + \alpha_V \cdot (T - T_0)), \quad (1.1)$$

где  $V$  и  $V_0$  – объемы жидкости при температурах  $T$  и  $T_0$ , м<sup>3</sup>;  $\alpha_V$  – коэффициент объемного расширения, 1/К.

Дилатометрический термометр расширения действует на основании использования теплового линейного расширения твердых тел (стержней, пластинок, спиралей). Линейные размеры стержня в зависимости от температуры определяются по формуле

$$l = l_0 \cdot (1 + \alpha_l \cdot (T - T_0)), \quad (1.2)$$

где  $l$  и  $l_0$  – линейные размеры при температуре  $t$  и  $t_0$ , м;  $\alpha_l$  – коэффициент линейного расширения, 1/К.

Перемещение стержня с большим коэффициентом линейного расширения передается через рычажную передачу указательной стрелке. Относительное перемещение стрелки  $\Delta l$ , вызванное изменением температуры, находят по формуле

$$l = k \cdot l_0 \cdot \alpha_l \cdot \Delta t, \quad (1.3)$$

где  $k$  – отношение плеч рычага;  $l_0$  – начальная длина стержня, м;  $\Delta t$  – изменение температуры, К.

**Манометрический термометр** состоит из чувствительного элемента – термобаллона, погруженного в измерительную среду, капиллярной трубки и трубчато-пружинного манометра. Все элементы соединены герметично, вследствие чего внутренняя полость термометра представляет собой замкнутое пространство, заполненное газом или жидкостью. При нагревании термобаллона в системе создается давление, которое вызывает перемещение механизма указателя.

В газовых термометрах термобаллон заполнен азотом, аргоном или гелием, и зависимость давления от температуры определяется по формуле:

$$\begin{aligned} P &= P_0 \cdot (1 + \alpha_V \cdot (T - T_0)); \\ P &= P_0 \cdot (l_0 \cdot \alpha_l \cdot (T - T_0)), \end{aligned} \quad (1.4)$$

где  $P$ ,  $P_0$  – давление газа при температурах  $T$  и  $T_0$ , Па;  $\alpha_V$  – коэффициент объемного расширения газа, 1/К.

**Термоэлектрический преобразователь (термопара)** работает на основании возникновения термо-ЭДС в цепи, состоящей из двух разнородных проводников при наличии разности температур  $t$  и  $t_0$  соединений их концов.

Одно из соединений термопары (холодный спай) находится в среде с постоянной температурой, а другое (горячий спай) – в измерительной среде. Зависимость  $E = f(t, t_0)$ , близка к линейной и определяется материалами проводников термоэлектрической цепи. Для

расчетов используются градуировочные таблицы значений  $E = f(t, t_0)$  при  $t_0 = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ , которые приведены в приложении А.

Обычно измерения проводят в окружающей среде, температура которой отличается от  $0 \text{ }^\circ\text{C}$ , поэтому необходимо вводить поправку на температуру холодных спаев. Ее можно рассчитать по формуле:

$$t_{\text{ист}} = t_{\text{и}} + k \cdot (t_x - t_0), \quad (1.5)$$

где  $t_{\text{ист}}$  и  $t_{\text{и}}$  – истинное и измеренное значение температуры,  $^\circ\text{C}$ ;  $t_x$  и  $t_0$  – температура холодных спаев при измерении и градуировке ( $t_0 = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ );  $k$  – поправочный коэффициент, значение которого приведено в приложении А.

Термопара работает в комплекте со вторичными приборами: милливольтметром и потенциометром.

Напряжение на выводах милливольтметра связано с термо-ЭДС соотношением:

$$U = \frac{E_t}{1 + \frac{R_{\text{вн}}}{R_V}}, \quad (1.6)$$

где  $R_{\text{вн}}$  – сопротивление измерительной цепи (термопары, соединительных проводов, контактов и т. д.), Ом;  $R_V$  – внутреннее сопротивление вольтметра, Ом.

**Термопреобразователи сопротивления** служат для преобразования температуры в параметр электрической цепи (сопротивление). Они бывают металлические проволочные и полупроводниковые.

Металлические проволочные термосопротивления характеризуются следующими зависимостями сопротивления от температуры: платиновые (ТСП) в диапазоне от  $0$  до  $650 \text{ }^\circ\text{C}$

$$R_t = R_0 \cdot (1 + \alpha_1 \cdot \Delta t + \alpha_2 \cdot \Delta t^2), \quad (1.7)$$

где  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  – температурные коэффициенты;  $\alpha_1 = 3,97 \cdot 10^{-3} \text{ } 1/\text{C}$ ;  $\alpha_2 = 5,85 \cdot 10^{-7} \text{ } 1/\text{C}^2$  – сопротивления медные (ТСМ) в диапазоне от  $-50 \text{ }^\circ\text{C}$  до  $180 \text{ }^\circ\text{C}$ .

$$R_t = R_0 \cdot (1 + \alpha_t \cdot \Delta t), \quad (1.8)$$

где  $\alpha_t = 4,26 \cdot 10^{-3} \text{ } 1/^\circ\text{C}$ .

Сопротивление  $R_0$  градуируют при  $0 \text{ }^\circ\text{C}$ . В Приложении Б приведены основные данные термосопротивлений.

Термосопротивления работают в комплекте со вторичными приборами: логометрами и измерительными мостами.

Схема уравновешенного моста приведена на рис. 1.1. В одно из плеч моста включено термосопротивление. Питание от источника напряжения  $GB$  подключено к одной из диагоналей моста, в другую включен измерительный прибор. Если мост уравновешен, то ток в измерительной диагонали равен нулю. Условие равновесия моста определяется по формуле:

$$R_2 \cdot R_t = R_1 \cdot R_3. \quad (1.9)$$

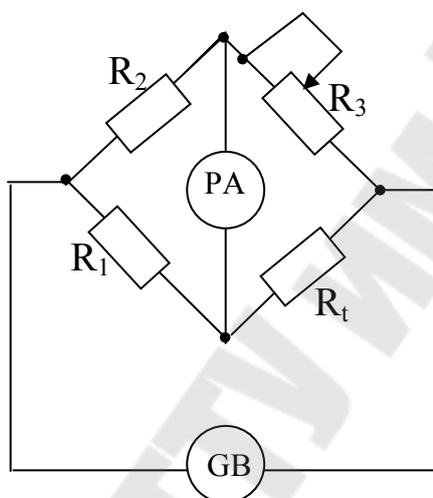


Рис. 1.1. Схема уравновешенного моста

Принцип измерения температуры состоит в том, что при изменении сопротивления  $R_t$  с помощью переменного резистора  $R_3$  добиваются равновесия моста. Указатель шкалы связан с подвижным контактом.

## 2. Практическая часть

### Задача 1.1

Измеренное значение термо-ЭДС для термопары типа ТХА при температуре холодных спаев  $0\text{ }^\circ\text{C}$  составило  $5,2\text{ мВ}$ . Найти значение температуры контролируемой среды

### Решение

Как говорилось ранее, термопара работает на основании возникновения термо-ЭДС в цепи, состоящей из двух разнородных провод-

ников при наличии разности температур  $t$  и  $t_0$ . Одно из соединений термопары (холодный спай) находится в среде с постоянной температурой, а другое (горячий спай) – в измерительной среде. Для расчетов используются градуировочные таблицы значений  $E = f(t, t_0)$  при  $t_0 = 0^\circ\text{C}$ , которые приведены в приложении А методических указаний.

Обычно измерения проводят в окружающей среде, температура которой отличается от  $0^\circ\text{C}$ , поэтому необходимо вводить поправку на температуру холодных спаев. Ее можно рассчитать по формуле:

$$t_{\text{ист}} = t_{\text{и}} + k(t_x - t_0),$$

где  $t_{\text{ист}}$  и  $t_{\text{и}}$  – истинное и измеренное значение температуры,  $^\circ\text{C}$ ;  $t_x$  и  $t_0$  – температура холодных спаев при измерении и градуировке ( $t_0 = 0^\circ\text{C}$ );  $k$  – поправочный коэффициент, значение которого приведено в приложении А.

При помощи линейной интерполяции найдем значение температуры при термо-ЭДС 5,2 мВ по приложению А методических указаний:

$$100 + \frac{200 - 100}{8,13 - 4,1} \cdot \frac{5,2 - 4,1}{1} = 128,53564^\circ\text{C}.$$

Так как измерение контролируемой среды выполнено при температуре холодных спаев  $0^\circ\text{C}$ , то значение температуры контролируемой среды

$$t_{\text{ист}} = 128,53564 + 1(0 - 0) = 128,53564^\circ\text{C}.$$

### Задача 1.2

Напряжение на выводах милливольтметра 0,8 мВ при подключении к термопаре типа ТПП. Определить значение температуры среды, если  $R_{\text{ВН}} = 25 \text{ Ом}$ ,  $R_V = 200 \text{ Ом}$ , а температура холодных спаев  $0^\circ\text{C}$ .

### Решение

Напряжение на выводах милливольтметра связано с термо-ЭДС соотношением:

$$U = \frac{E_t}{1 + \frac{R_{\text{ВН}}}{R_V}},$$

где  $R_{\text{вн}}$  – сопротивление измерительной цепи (термопары, соединительных проводов, контактов и т. д.), Ом;  $R_V$  – внутреннее сопротивление вольтметра, Ом.

$$E_t = U \cdot \left(1 + \frac{R_{\text{вн}}}{R_V}\right) = 0,8 \cdot 10^{-3} \cdot \left(1 + \frac{25}{200}\right) = 0,9 \cdot 10^{-3} \text{ В.}$$

Для расчетов используются градуировочные таблицы значений  $E = f(t, t_0)$  при  $t_0 = 0^\circ\text{C}$ , которые приведены в приложении А.

При помощи линейной интерполяции найдем значение температуры среды:

$$100 + \frac{100 + 200}{0,64 + 1,421} \cdot (0,9 - 0,64) = 138.$$

Температура среды будет = 138 °С.

### Задачи для самостоятельного решения

1. При изменении температуры на  $10^\circ\text{C}$  относительное изменение высоты столбика ртутного термометра составляет 1,02 по сравнению с первоначальным. При каком изменении температуры оно будет 1,05, если коэффициент объемного расширения ртути  $1,72 \cdot 10^{-4} \text{ 1/}^\circ\text{K}$ ?

2. При увеличении перепада температур на  $200^\circ\text{C}$  относительное изменение длины стержня равно 1 % от первоначального значения  $l_0$ . Найти коэффициент линейного расширения материала стержня дилатометрического термометра.

3. Жидкостный манометр, заполненный спиртом, градуируется при температуре  $20^\circ\text{C}$ ; плотность спирта  $\rho_{V0} = 800 \text{ кг/м}^3$ . Определить, как изменится чувствительность прибора при температуре  $30^\circ\text{C}$ , если  $\rho_V = 790 \text{ кг/м}^3$ . Найти погрешность измерения давления  $P_{\text{изб}} = 1 \text{ кПа}$ .

4. Найти начальный перепад температур термобаллона, если при его увеличении на  $200^\circ\text{C}$  давление в термосистеме газового манометрического термометра увеличилось в 2 раза. Коэффициент объемного расширения газа равен  $0,0036 \text{ 1/К}$ .

5. Найти значение термо-ЭДС для термопары типа ТПП при температуре измеряемой среды  $60^\circ\text{C}$ . Температура холодных спаев  $0^\circ\text{C}$  (Приложение А).

6. Найти значения температурной чувствительности термопары типа ТХК в диапазоне температур от 0 до 5000 °С (Приложение А). Построить график зависимости чувствительности от температуры.

7. Измеренное значение термо-ЭДС при температуре 150 °С составляет 1,1 В. Определить тип использованной термопары и погрешность нахождения термо-ЭДС  $E(150, t_0)$  при  $t_0 = 0$  °С (Приложение А).

8. При измерении температуры с помощью термопары типа ТХА (Приложение А) термо-ЭДС равна 5,5 мВ при температуре холодных спаев 20 °С. Найти истинное и измеренное значения температуры.

9. До какой температуры окружающей среды, в которой расположены холодные спаи термопары типа ТПП (Приложение А), можно проводить измерение температуры в диапазоне от 100 до 200 °С, с погрешностью измерения не выше 10 °С?

10. Построить график зависимости  $E_t = f(t)$  для термопары типа ТХА в диапазоне от 0 до 600 °С при  $t_0 = 0$  °С. Как изменится график при температуре холодных спаев 20 °С?

11. Термопара ТХА помещена в среду, температура которой меняется от 50 до 100 °С. Определить изменение напряжения на выводах милливольтметра с внутренним сопротивлением  $R_V = 150$  Ом, если сопротивление измерительной цепи  $R_{ВН} = 15$  Ом, а температура холодных спаев равна градуировочной.

12. Напряжение на выводах милливольтметра 0,66 мВ при подключении к термопаре типа ТПП. Определить значение температуры среды, если  $R_{ВН} = 18$  Ом,  $R_V = 170$  Ом, а температура холодных спаев 0 °С.

13. Милливольтметр снабжен шкалами для измерения напряжения 0–10 мВ и температуры 0–100 °С. Он отградуирован при сопротивлениях  $R_V = 150$  Ом и  $R_{ВН} = 15$  Ом. Определить систематическую погрешность измерения при подключении термопары с  $R_{ВН} = 10$  Ом.

14. Термосопротивление ТСМ 50М выполнен с допуском на номинальное сопротивление  $R_0 = 50 \pm 0,1$  Ом. Определить погрешность измерения температуры 100 °С.

15. При измерении сопротивления с помощью схемы уравновешенного моста сопротивление  $R_3 = 1200$  Ом. Найти температуру контролируемой среды, если  $R_2 = 800$  Ом,  $R_1 = 100$  Ом, а в качестве  $R_t$  используется терморезистор ТСП 100 П.

16. В схеме измерения сопротивления с помощью уравновешенного моста на рис. 1 сопротивления плеч  $R_2 = 10$  кОм и  $R_1 = 1$  кОм.

Определить полное сопротивление переменного резистора  $R_3$ , если в качестве  $R_t$  применяется терморезистор ТСМ 100 М, а температура меняется от  $-50$  до  $+50$  °С.

17. При изменении температуры на  $100$  °С сопротивление медного терморезистора увеличилось в  $1,2$  раза. Найти первоначальное и конечное значения температуры.

18. Измеренное значение сопротивления терморезистора при температуре  $120$  °С составило  $146$  Ом. Определить его градуировку и погрешность нахождения температуры.

19. Найти значения температурной чувствительности платинового терморезистора ТСП 100П в диапазоне от  $0$  до  $200$  °С в точках шкалы через каждые  $50$  °С. Построить график зависимости чувствительности от температуры.

20. Измеренные значения сопротивления платинового терморезистора градуировки  $50$  П составили  $75$  Ом. Найти значение температуры контролируемой среды.

21. Найти значение сопротивления платинового терморезистора при температурах измеряемой среды  $60$  °С, если при  $t = 0$  °С  $R_0 = 100$  Ом.

## Лабораторная работа 2 «Способы измерения давления»

Цель занятия: изучить способы измерения давления, решить задачи для различных способов измерений.

### 1. Теоретическая часть

**Давление** – величина, выражающая отношение силы к единице поверхности. В международной системе единиц (СИ) за единицу давления принята сила в один ньютон, действующая на поверхность в  $1 \text{ м}^2$  и выражаемая в паскалях (Па):  $1 \text{ Н/м}^2 = 1 \text{ Па}$ .

Для технических измерений (в виде исключения) применяют следующие внесистемные единицы давления: физическая атмосфера ( $1 \text{ атм} = 760 \text{ мм рт. ст.} = 1,033227 \text{ кгс/см}^2 = 1,01325 \text{ бар}$ ), техническая атмосфера ( $1 \text{ ат} = 1 \text{ кгс/м}^2$ ), миллиметр ртутного столба ( $1 \text{ мм рт. ст.} = 133,3224 \text{ Па}$ ), бар ( $1 \text{ бар} = 10^5 \text{ Па}$ ) и другие.

Приборы для измерения давления и разрежения делят на следующие группы.

По роду измеряемой величины: барометры (измеряют атмосферное давление), манометры, вакуумметры, мановакуум-метры, дифференциальные манометры ( $\Delta p$  – разность, перепад давлений).

По принципу действия:

- жидкостные – давление уравнивается столбом жидкости;
- поршневые – давление, действуя по одну сторону поршня, уравнивается давлением, создаваемым силой, приложенной с противоположной стороны. Поршневые манометры относятся к числу наиболее точных приборов, поэтому применяются главным образом для поверки и градуировки приборов;

- деформационные – давление деформирует различного рода чувствительные элементы. Величина деформации, увеличенная при помощи передаточного механизма и преобразованная в перемещение указателя, является мерой измеряемого давления;

- электрические – принцип действия их основан на изменении электрических свойств некоторых материалов при воздействии на них давления;

- радиоактивные – измеряемое давление вызывает соответствующее изменение ионизации, производимой излучениями и рекомбинацией ионов.

При бурении скважин чаще всего используются пружинные и электрические (с магнитоупругим преобразователем) манометры.

Манометры для измерения давления жидкости и газов конструктивно не отличаются.

**Жидкостные манометры.** В жидкостных манометрах (рис. 2.1) используется принцип сообщающихся сосудов. Действие их основано на уравнивании измеряемого давления силой тяжести столба жидкости.

Для U-образного двухтрубного манометра давление определяется по разности уровней жидкости в трубах, в которые подаются атмосферное и абсолютное давления (или разность давлений)

$$P_{\text{изб}} = \rho gh; \quad (2.1)$$

$$\Delta P = P_1 - P_2 = \rho gh, \quad (2.2)$$

где  $\rho$  – плотность заполняющей трубки жидкости,  $\text{кг/м}^3$ ;  $g$  – ускорение силы тяжести,  $\text{м/с}^2$ .

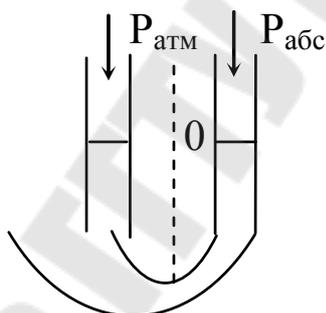


Рис. 2.1. Жидкостный манометр

**Деформационные манометры** (рис. 2.2) действуют по принципу преобразования давления в перемещение упругого элемента. В зависимости от типа применяемых элементов различают мембранные, сифонные, трубчато-пружинные манометры.

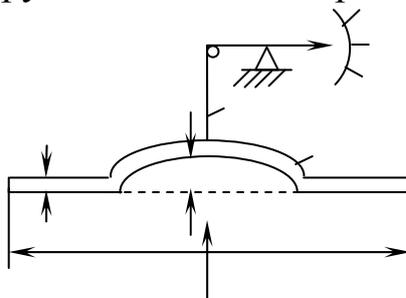


Рис. 2.2. Деформационный манометр (мембранный):  
1 – мембрана; 2 – рычаг; 3 – стрелка; 4 – шкала

Чувствительным элементом этих приборов могут быть серповидная трубчатая пружина (трубка Бурдона), многовитковая трубчатая пружина (геликс), плоская мембрана, сильфон.

Максимальное перемещение центра мембраны  $\delta_{\max}$ , мм под действием давления (рисунок 3) определяется по формуле:

$$\delta_{\max} = 0,17 \cdot \frac{PD^4}{16E_G h^3}, \quad (2.3)$$

где  $E_G$  – модуль упругости, Па;  $D$  – диаметр мембраны, мм;  $h$  – толщина мембраны, мм;  $P$  – давление, Па.

Максимальное допустимое механическое напряжение на мембране  $\sigma_{\max}$ , Па определяется по формуле:

$$y_{\max} = 0,75 \cdot \frac{PD^2}{4h^2}. \quad (2.4)$$

**Электрические преобразователи давления** действуют по принципу преобразования давления в электрический сигнал. К таким преобразователям относятся пьезоэлектрические, тензометрические, емкостные.

В пьезоэлектрических преобразователях используется явление возникновения напряжения на гранях кристаллов при воздействии на них механического усилия или давления. Напряжение  $U$ , В на гранях пьезокристаллов определяется по формуле

$$U = \frac{10^{12} KPS}{\frac{C_{\text{вх}}}{n} + C_0}, \quad (2.5)$$

где  $K$  – пьезоэлектрическая постоянная, Кл/н (для кварца  $K = 2,2 \cdot 10^{-12}$  Кл/н);  $S$  – площадь поверхности кристалла, м<sup>2</sup>;  $C_{\text{вх}}$  – емкость измерительной цепи, пФ;  $C_0$  – емкость кристалла, пФ;  $n$  – число пластинок кристалла;  $P$  – давление, Па.

Емкость  $C_0$ , пФ пьезокристалла определяется по формуле:

$$C_0 = \frac{8,9 \cdot \varepsilon \cdot S}{h}, \quad (2.6)$$

где  $\varepsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость для кварца ( $\varepsilon = 4,5$ );  $h$  – толщина кристалла, м;  $S$  – площадь пластины, м<sup>2</sup>.

В тензометрических преобразователях давления используется явление изменения сопротивления металлических проволочных и полупроводниковых резисторов при их деформации.

Обычно тензометрические датчики наклеивают на упругие элементы (например, мембраны) преобразователей давления и включают в мостовые измерительные схемы.

Относительное изменение сопротивления  $\Delta R$  линейно зависит от изменения длины  $\Delta l$  и определяется по формуле

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{K_q \Delta l}{l} = \frac{K_q F}{SE_G}, \quad (2.7)$$

где  $K_q$  – коэффициент тензочувствительности (0,5 – 2,5);  $F$  – сила, приложенная к площади упругого элемента, кН;  $E_G$  – модуль упругости, ГПа;  $S$  – площадь упругого элемента, мм<sup>2</sup>.

В емкостных преобразователях давления использовано явление изменения емкости плоского конденсатора при изменении расстояния между его обкладками под действием давления.

Емкость плоского конденсатора  $C$ , Ф определяется по формуле

$$C = \frac{\epsilon_a S}{d} \quad (2.8)$$

где  $\epsilon_a$  – абсолютная диэлектрическая постоянная, Ф/м;  $S$  – площадь пластины, м<sup>2</sup>;  $d$  – расстояние между пластинами, м.

## 2. Практическая часть

### Задача 2.1

Для мембраны манометра толщиной 0,8 мм, диаметром 64 мм и модулем упругости 150 ГПа, допустимое напряжение не должно превышать 450 МПа. Определить наибольшее измеряемое давление и максимально допустимое перемещение центра мембраны.

### Решение

Максимально допустимое перемещение центра мембраны выражается формулой 2.3:

$$\delta_{\max} = 0,17 \cdot \frac{PD^4}{16E_G h^3},$$

где  $E_G$  – модуль упругости, Па;  $D$  – диаметр мембраны, мм;  $h$  – толщина мембраны, мм;  $P$  – давление, Па.

Максимальное допустимое механическое напряжение на мембране  $\sigma_{\max}$ , Па определяется по формуле 2.4

$$\sigma_{\max} = 0,75 \cdot \frac{PD^2}{4h^2}.$$

Из формулы 2.2 выразим переменную  $P$  и получим следующее выражение:

$$P = \frac{4h^2\sigma_{\max}}{0,75D^2}. \quad (2.3)$$

Подставляя в выражение 2.3 исходные данные, получим следующее значение наибольшего измеряемого давления:

$$P = \frac{4 \cdot 0,8^2 \cdot 450 \cdot 10^6}{0,75 \cdot 64^2} = 0,375 \cdot 10^6 \text{ Па} = 0,375 \text{ МПа}.$$

Подставляя полученное значение давления в формулу 2.1, найдем значение максимально допустимого перемещения центра мембраны:

$$\delta_{\max} = 0,17 \cdot \frac{0,375 \cdot 10^6 \cdot 64^2}{16 \cdot 150 \cdot 10^9 \cdot 0,8^3} = 870 \cdot 10^{-3} = 0,87 \text{ мм}.$$

Ответ:  $P = 0,375$  МПа,  $\delta_{\max} = 0,87$  мм.

### Задача 2.2

Определить напряжение на обкладках пьезоэлектрического преобразователя давления, состоящего из пяти пластинок кварца толщиной 1 мм и площадью поверхности 100 мм<sup>2</sup>, если емкость измерительной цепи  $C_{вх} = 20$  пФ, а к преобразователю приложено давление 0,5 МПа.

### Решение

В пьезоэлектрических преобразователях используется явление возникновения напряжения на гранях кристаллов при воздействии на них механического усилия или давления. Напряжение  $U$ , В на гранях пьезокристаллов определяется по формуле

$$U = \frac{10^{12} \cdot K \cdot P \cdot S}{\frac{C_{\text{вх}}}{n} + C_0}$$

где  $K$  – пьезоэлектрическая постоянная, Кл/н, (для кварца  $K = 2,2 \cdot 10^{-12}$  Кл/н);  $S$  – площадь поверхности кристалла, м<sup>2</sup>;  $C_{\text{вх}}$  – емкость измерительной цепи, пФ;  $C_0$  – емкость кристалла, пФ;  $n$  – число пластинок кристалла;  $P$  – давление, Па.

Емкость  $C_0$ , пФ пьезокристалла определяется по формуле:

$$C_0 = \frac{8,9 \cdot \varepsilon \cdot S}{h},$$

где  $\varepsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость для кварца ( $\varepsilon = 4,5$ );  $h$  – толщина кристалла, м;  $S$  – площадь пластины, м<sup>2</sup>.

$$C_0 = \frac{8,9 \cdot 4,5 \cdot 0,0001}{0,001} = 4,005, \text{ пФ.}$$

Напряжение на обкладках пьезоэлектрического преобразователя давления:

$$U = \frac{10^{12} \cdot 2,2 \cdot 10^{-12} \cdot 0,5 \cdot 10^6 \cdot 5 \cdot 0,0001}{\frac{20}{5} + 4,005} = 68,71, \text{ В.}$$

### Задачи для самостоятельного решения

1. Атмосферное давление в зоне установки двухтрубного манометра, заполненного ртутью с  $\rho_v = 14 \text{ г/см}^3$ , равно 101,3 кПа. Определить избыточное и абсолютное давления, если разность уровней 100 мм.

2. Абсолютное давление контролируемой среды менялось от 50 до 120 кПа, атмосферное давление 101,3 кПа. Определить, в каких пределах меняется разность уровней в двухтрубном манометре, заполненном ртутью с  $\rho_v = 14 \text{ г/см}^3$ .

3. Жидкостный манометр отградуирован при атмосферном давлении 101,3 кПа на измерение абсолютного давления до 130 кПа. Изменится ли избыточное давление прибора, заполненного ртутью, при падении атмосферного давления до 97 кПа? Определить относительную погрешность измерения абсолютного давления, если показание прибора соответствует 130 кПа.

4. Жидкостный манометр, заполненный спиртом, градуируется при температуре 20 °С; плотность спирта  $\rho_{v0} = 800 \text{ кг/м}^3$ . Определить,

как изменится чувствительность прибора при температуре  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ , если  $p_V = 790\text{ кг/м}^3$ . Найти погрешность измерения давления  $P_{\text{изб}} = 1\text{ кПа}$ .

5. Длина каждой из трубок U-образного манометра  $0,5\text{ м}$ . Для каких избыточных давлений можно использовать манометр, если его заполнить ртутью ( $p_V = 13800\text{ кг/м}^3$ )?

6. Найти начальный перепад температур термобаллона, если при его увеличении на  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$  давление в термосистеме газового манометрического термометра увеличилось в 2 раза. Коэффициент объемного расширения газа равен  $0,0036\text{ 1/К}$ .

7. Для мембраны манометра толщиной  $1\text{ мм}$ , диаметром  $50\text{ мм}$  и модулем упругости  $200\text{ ГПа}$ , допустимое напряжение не должно превышать  $400\text{ МПа}$ . Определить наибольшее измеряемое давление и максимально допустимое перемещение центра мембраны.

8. Определить напряжение на обкладках пьезоэлектрического преобразователя давления, состоящего из пяти пластинок кварца толщиной  $0,9\text{ мм}$  и площадью поверхности  $150\text{ мм}^2$ , если емкость измерительной цепи  $C_{\text{вх}} = 9\text{ пФ}$ , а к преобразователю приложено давление  $0,45\text{ МПа}$ .

9. Подобрать число пластин пьезоэлектрического преобразователя так, чтобы при давлении  $1\text{ МПа}$  напряжение на его выходе было  $30\text{ В}$ . Емкость преобразователя  $C_0 = 5\text{ пФ}$ , емкость измерительной цепи  $C_{\text{вх}} = 8\text{ пФ}$ , площадь пластины  $S = 100\text{ мм}^2$ .

10. Тензодатчик сопротивлением  $500\text{ Ом}$  и длиной  $50\text{ мм}$  наклеен на мембрану деформационного манометра. При давлении  $5\text{ кПа}$  его длина стала  $55\text{ мм}$ . Определить чувствительность тензодатчика и изменение сопротивления, если  $k_D = 2$ .

11. Для измерения давления воздуха используют емкостный манометр. При отсутствии давления расстояние между обкладкой и тонкой мембраной  $1\text{ мм}$ , емкость прибора  $C = 100\text{ пФ}$ . Определить значения емкости при перемещении мембраны на  $0,2$  и  $0,8\text{ мм}$  при давлениях  $10$  и  $40\text{ кПа}$ . Определить чувствительность емкостного манометров.

12. Емкостный манометр используют для измерения давления жидкости от  $10$  до  $50\text{ кПа}$ , причем емкость меняется от  $4$  до  $20\text{ пФ}$ . В измерительной цепи его применяют в резонансном контуре с индуктивностью  $0,1\text{ мГн}$ , питание которого от источника переменного напряжения с  $f = 4\text{ МГц}$ . При каком давлении контур будет работать в режиме резонанса? Условие резонанса  $X_L = X_C$

## Лабораторная работа 3 «Измерение расхода жидкости и газа»

Цель занятия: изучение способов измерения расхода жидкости и газа.

### 1. Теоретическая часть

**Расход** – величина, которая определяется для равномерно перемещаемого вещества отношением массы (массовый расход), количества (молярный расход) или объема (объемный расход) вещества, проходящего через определенное сечение (перпендикулярное к направлению скорости потока), к промежутку времени, за который это перемещение происходит. Расход выражают соответственно в кг/с, моль/с и м<sup>3</sup>/с, иногда – в т/ч, кмоль/с, л/мин.

**Количество** – это масса или объем вещества, перемещаемого за некоторый промежуток времени, измеряется в мз и кг.

Приборы для определения расхода называются **расходомерами**, а количества – **счетчиками**.

Для измерения расхода используют ряд физических явлений, на основе которых по принципу действия расходомеры и счетчики количества делят на следующие группы: *расходомеры переменного и постоянного перепада давления, тахометрические, ультразвуковые, электромагнитные, вихревые и кориолисовы*.

В зависимости от условий применения приборы могут быть разделены на *наземные* и *скважинные*.

#### 1 Измерение расхода методом переменного перепада давления

Расходоизмерительная система состоит из сужающего устройства (диафрагма, сопло), устанавливаемого в трубопроводе, импульсных трубок и дифманометров.

Действие расходомеров этого типа основано на измерении перепада давления потока на сужающем устройстве. Объемный расход газов и жидкостей  $Q_V$ , м<sup>3</sup>/с через сужающее устройство определяется по формуле:

$$Q_V = \alpha_Q \cdot \varepsilon_C \cdot m_Q^2 \cdot \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho_V}}, \quad (3.1)$$

где  $\alpha_Q$  – коэффициент расхода (приложение В);  $\varepsilon_C$  – коэффициент сжимаемости (для жидкости  $\varepsilon_C = 1$ );  $\rho_V$  – плотность жидкости или газа, кг/м<sup>3</sup>;  $\Delta P$  – перепад давления, Па;  $m_Q = d/D$  – характеристический коэффициент ( $0,05 \leq m_Q \leq 0,6$ );  $d$  – диаметр сужающего устройства, м;  $D$  – диаметр трубопровода, м.

При измерении расхода с помощью сужающих устройств требуются нормированные условия среды (температура и атмосферное давление).

## 2 Турбинные расходомеры

В турбинных расходомерах основным элементом служит турбинка (крыльчатка), вращающаяся в потоке жидкости. Вращение передается через специальный механизм к счетному устройству.

Частота вращения турбинки  $\omega$ , рад/с определяется по формуле (3.2)

$$\omega = \frac{Kv_{\text{ср}}}{l} = \frac{KQ_V}{S \cdot l}, \quad (3.2)$$

где  $K$  – постоянный коэффициент для данного типа счетчика;  $l$  – шаг лопастей турбинки, м;  $S$  – площадь поперечного сечения трубы, м<sup>2</sup>;  $Q_V$  – объемный расход, м<sup>3</sup>/с;  $v_{\text{ср}}$  – средняя скорость потока, м/с.

## 3 Объемные расходомеры

В объемных расходомерах вращаются два подвижных элемента (шестерни), отмеривающие при своем движении определенные объемы жидкости (измерительный объем). Объемный расход определяется по формуле:

$$Q_V = \frac{q \cdot n}{t_1 - t_2}, \quad (3.3)$$

где  $q$  – измерительный объем, м<sup>3</sup>;  $n$  – количество измеренных объемов;  $(t_1 - t_2)$  – промежуток времени, с.

Контроль и учет расхода жидкости проводится по результатам подсчета числа оборотов шестерен.

## 4 Индукционные (электромагнитные) расходомеры

Индукционные расходомеры служат для непосредственного преобразования расхода в электрический сигнал. Они предназначены для измерения расхода проводящих жидкостей. Действие индукцион-

ных расходомеров основано на возникновении ЭДС в трубопроводе между полюсами электромагнита, которая снимается с помощью электродов.

ЭДС определяется по формуле:

$$E = B \cdot D \cdot v_{cp} = \frac{B \cdot D \cdot Q}{S}, \quad (3.4)$$

где  $B$  – магнитная индукция между полюсами, Тл;  $D$  – внешний диаметр трубы, равный расстоянию между электродами, м;  $S$  – площадь поперечного сечения трубы, м<sup>2</sup>.

Для тонкостенных трубопроводов ЭДС определяется по формуле:

$$E = \frac{4B \cdot Q}{\rho D}. \quad (3.5)$$

## 2. Практическая часть

### Задача 3.1

При измерении расхода воды в трубопроводе диаметром  $D = 100$  мм с помощью нормальной диафрагмы  $d = 50$  мм перепад давления составляет 100 кПа. Найти значения объемного расхода.

### Решение

Расходоизмерительная система состоит из сужающего устройства (диафрагма, сопло), устанавливаемого в трубопроводе, импульсных трубок и дифманометров.

Действие расходомеров этого типа основано на измерении перепада давления потока на сужающем устройстве. Объемный расход газов и жидкостей  $Q_V$ , м<sup>3</sup>/с через сужающее устройство определяется по формуле:

$$Q_V = \alpha_Q \cdot \varepsilon_C \cdot m_Q^2 \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \frac{\sqrt{2 \cdot \Delta P}}{\rho_V},$$

где  $\alpha_Q$  – коэффициент расхода (приложение В);  $\varepsilon_C$  – коэффициент сжимаемости (для жидкости  $\varepsilon_C = 1$ );  $\rho_V$  – плотность жидкости или газа, кг/м<sup>3</sup>;  $\Delta P$  – перепад давления, Па;  $m_Q = d/D$  – характеристический коэффициент ( $0,05 \leq m_Q \leq 0,6$ );  $d$  – диаметр сужающего устройства, м;  $D$  – диаметр трубопровода, м.

При измерении расхода с помощью сужающих устройств требуются нормированные условия среды (температура и атмосферное давление).

$$Q_V = 0,737 \cdot 1 \cdot \frac{50^2 \cdot 10^{-6}}{100^2 \cdot 10^{-6}} \cdot \frac{3,14 \cdot 50^2 \cdot 10^{-6}}{4} \cdot \frac{\sqrt{2 \cdot 100 \cdot 10^3}}{1000} \approx 163 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}.$$

Значения объемного расхода

### Задачи для самостоятельного решения

1. По трубопроводу диаметром  $D = 100$  мм движется поток жидкости со средней скоростью  $5$  м/с. Определить объемный и массовый расходы жидкости, если ее плотность  $\rho_V = 955$  кг/м<sup>3</sup>.

2. Какие диаметры отверстий должны быть у сужающих устройств для измерения расхода в трубах диаметром  $D = 80$  мм?

3. При измерении расхода воды в трубопроводе диаметром  $D = 100$  мм с помощью нормальной диафрагмы  $d = 50$  мм перепад давления составляет  $100$  кПа. Найти значения объемного расхода.

4. Расход воздуха в трубопроводе диаметром  $D = 300$  мм меняется от  $140$  до  $200$  м<sup>3</sup>/ч. Определить, на какие перепады давления должен быть рассчитан дифманометр, устанавливаемый в нормальную диафрагму  $d = 30$  мм. Плотность воздуха  $1,033$  кг/м<sup>3</sup>, коэффициент сжимаемости  $\varepsilon = 0,87$ .

5. При изменении расхода в  $1,5$  раза перепад давления в сужающем устройстве увеличился на  $10$  кПа. Определить первоначальное значение перепада давления.

6. Наибольший расход воды в трубопроводе диаметром  $D = 250$  мм равен  $240$  м<sup>3</sup>/ч. К сужающему устройству подключен дифманометр с верхним пределом шкалы  $\Delta p = 20$  кПа. Подобрать параметры нормальной диафрагмы или сопла для измерения расхода в данном случае.

7. Для измерения расхода воздуха с нормальными значениями плотности  $\rho_V = 1,035$  кг/м<sup>3</sup> и коэффициента сжимаемости  $\varepsilon_C = 0,91$  в трубопроводе диаметром  $D = 100$  мм используется нормальное сопло с  $m^2_Q = 0,31$ . Номинальное значение расхода  $Q_H = 150$  м<sup>3</sup>/ч. Найти погрешность определения расхода, если в результате изменения температуры и влажности воздуха его параметры стали равны  $\rho_V = 1,08$  кг/м<sup>3</sup> и  $\varepsilon_C = 0,85$ .

8. Расход в турбинном тахометрическом расходомере меняется от 30 до 70 м<sup>3</sup>/ч. Каким оборотам турбинки соответствуют эти значения расхода, если проходной диаметр 50 мм, а шаг лопастей турбинки 40 мм? Коэффициент  $K$  принять равным 0,6.

9. Частота вращения турбинки тахометрического расходомера равна 900 об/мин. Найти значение расхода, если проходной диаметр 60 мм, а на турбинке диаметром 40 мм установлено восемь лопастей. Коэффициент  $K = 0,75$ .

10. При изменении расхода в 1,2 раза частота вращения турбины увеличилась на 100 об/мин. Найти первоначальное число оборотов и чувствительность тахометрического расходомера, если первоначальный расход был 10 м<sup>3</sup>/ч.

11. В турбинном расходомере с индуктивным преобразователем в диапазоне частоты вращения 500...800 об/мин значение ЭДС меняется от 20 до 40 В. Определить частоту вращения и расход при напряжении 25 В, если шкала градуирована от 20 до 80 м<sup>3</sup>/ч. Шкала прибора равномерная

12. В турбинном расходомере с индуктивным преобразователем измерительным прибором служит вольтметр с диапазоном измерения 10 В и классом точности 1,5. Определить наибольшую абсолютную погрешность измерения расхода, если чувствительность расходомера 0,5 В·час/м<sup>3</sup>

13. Шестерни в объемном расходомере сделали в течение 20 мин 120 оборотов. Определить средний расход, если объем отсекаемой жидкости 50 см<sup>3</sup>.

14. Расход воды в тонкостенном трубопроводе диаметром 40 мм изменяется от 50 до 100 м<sup>3</sup>/ч. Его измеряют с помощью индукционного расходомера, в магнитной цепи которого создается индукция  $B = 1,2$  Тл. Определить изменения ЭДС в измерительной обмотке.

15. В индукционном расходомере значения ЭДС 0,8 В. Определить расход жидкости в трубопроводе с внутренним диаметром  $d_{\text{вн}} = 30$  мм и внешним  $D = 40$  мм, если создаваемая магнитной цепью индукция  $B = 1$  Тл.

16. При градуировке индукционного расходомера верхнему пределу 500 м<sup>3</sup>/ч соответствует значение ЭДС 6 В для трубопровода  $d_{\text{вн}} = 41$  мм и  $D = 50$  мм. Определить индукцию в магнитной цепи и цену деления шкалы прибора.

## Лабораторная работа 4 «Измерение уровня жидкости»

Цель занятия: изучение способов измерения уровня.

### 1. Теоретическая часть

**Уровень** – расстояние от поверхности раздела двух сред до любой произвольно выбранной отметки выше или ниже этой поверхности.

Различают уровнемеры:

- уровнемеры абсолютного значения уровня;
- сигнализаторы уровня (дают информацию о превышении или понижении уровня относительно заданной отметки);
- измерители раздела сред.

По принципу действия различают уровнемеры: механические, буйковые, гидростатические, акустические, емкостные, радарные.

В зависимости от характера показаний уровнемеры подразделяются на фиксирующие значения уровня непрерывно, дискретно с изменением уровня на заданную глубину и фиксирующие максимальное и минимальное значение уровня.

В зависимости от целей наблюдения за уровнем уровнемеры подразделяются на уровнемеры разовых замеров, периодических замеров (измеряющие уровень через заданное время) и уровнемеры непрерывного наблюдения.

По виду предоставляемой информации уровнемеры подразделяются на уровнемеры индикации (звуковые, световые, электрические сигналы), с измерительными приборами и графической записью – самописцы; более сложные комплексы включают измерительные показывающие приборы и регистраторы.

В зависимости от расстояния передачи информации уровнемеры подразделяются на уровнемеры местного и дистанционного измерения, а в зависимости от вида чувствительного элемента – на поплавковые, с электрическим чувствительным элементом, упругим чувствительным элементом.

В зависимости от способа измерения уровнемеры подразделяются на две группы: уровнемеры, непосредственно измеряющие уровень, т. е. следящие за изменением положения зеркала жидкости (контактные и бесконтактные), и уровнемеры, косвенно измеряющие уровень.

**Поплавковые уровнемеры** действуют по принципу перемещения поплавка на поверхности жидкости. Это перемещение затем с помощью механической или электрической передачи поступает на прибор. Уравнение равновесия систем имеет вид:

$$\rho_V V + m_{\text{пр}} = m_{\text{п}} \pm m_{\text{тр}}, \quad (4.1)$$

где  $V$  – объем вытесняемой поплавком жидкости,  $\text{м}^3$ ;  $\rho_V$  – плотность жидкости,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $m_{\text{пр}}$ ,  $m_{\text{п}}$ ,  $m_{\text{тр}}$  – соответственно масса противовеса, поплавка, неуравновешенной части троса.

**Пьезометрические (гидростатические) уровнемеры** основаны на принципе продувания воздуха через пневматическую трубку, опущенную в резервуар и измерения гидростатического давления  $P$ , Па по формуле:

$$P = \rho gh, \quad (4.2)$$

где  $\rho$  – плотность жидкости,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $g$  – ускорение силы тяжести,  $\text{м}/\text{с}^2$ ;  $h$  – высота столба жидкости, м.

Принцип работы **уровнемеров–дифманометров** основан на измерении разности давлений жидкости в резервуаре и уравнительном сосуде. Дифманометры- уровнемеры следует градуировать при определенной плотности жидкости.

Разность давления в уровнемерах-дифманометрах равна гидростатическому давлению столба жидкости и определяется по формуле

$$\Delta P = \rho gh. \quad (4.3)$$

**Электрические преобразователи уровня** (емкостные) основаны на использовании емкостного метода, т.е. зависимости конденсаторного устройства от уровня заполняющей его жидкости. Устройство емкостного уровнемера представляет собой параллельно соединенные цилиндрические конденсаторы  $C_1$  (образован частью электродов и жидкостью, уровень которой изменяется) и  $C_0$  (образован частью электродов и воздухом).

Емкость уровнемера определяется по формуле:

$$C = C_1 + C_0 = (l \cdot \varepsilon_{a2} + (l_0 - l) \varepsilon_{a1}) \frac{2\pi}{\ln \frac{D_1}{D_2}}, \quad (4.4)$$

где  $l_0$  и  $l$  – полная длина цилиндра (резервуара) и длина его, заполненная жидкостью, м;  $\epsilon_{a1}$  и  $\epsilon_{a2}$  – абсолютные диэлектрические проницаемость воздуха и жидкости, Ф/м;  $D_1$  и  $D_2$  – диаметры внешнего цилиндра (резервуара) и внутреннего цилиндра (электрода), м.

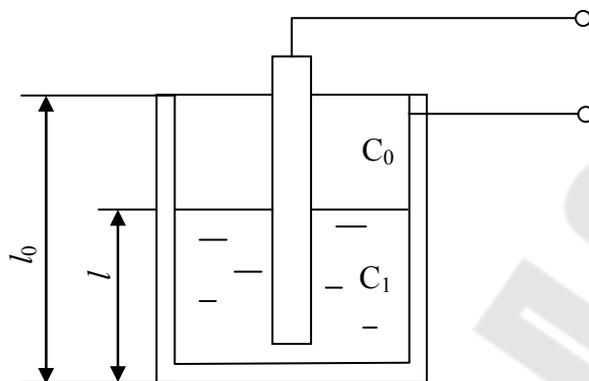


Рис. 4.1. Емкостной уровнемер

**Волновые уровнемеры** действуют по принципу отражения звуковых или электромагнитных волн от поверхности измеряемой жидкости. Обычно в волновых уровнемерах измеряется время запаздывания отраженного сигнала относительно излучаемого по формуле

$$\tau = \frac{2h}{v}, \quad (4.5)$$

где  $h$  – расстояние от излучателя до поверхности, м;  $v$  – скорость распространения волны в среде над измеряемой поверхностью, м/с;

Скорость распространения электромагнитной волны  $v$ , м/с зависит от свойств среды и определяется по формуле:

$$v = \sqrt{\frac{1}{\epsilon_a \mu_a}}, \quad (4.6)$$

где  $\epsilon_a$ ,  $\mu_a$  – абсолютная диэлектрическая (Ф/м) и магнитная (Гн/м) проницаемость среды.

Чаще всего в расчетах применяется скорость распространения электромагнитных волн в воздухе, которая совпадает со скоростью света и составляет  $299 \cdot 10^6$  м/с.

Скорость звуковой волны  $v$ , м/с в воздухе определяется по формуле

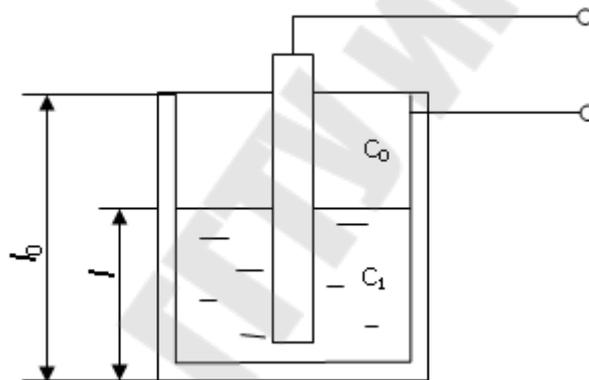
$$v = \sqrt{\frac{\varepsilon_C \cdot P}{\rho}} = \sqrt{\varepsilon_C \cdot K_R \cdot T}, \quad (4.7)$$

где  $\varepsilon_C$  – коэффициент сжимаемости газов, м<sup>2</sup>/Н;  $K_R$  – универсальная газовая постоянная, равная 8314 Дж/кмоль · К);  $P$ ,  $T$  – давление, Па и температура среды, К;  $\rho$  – плотность среды, кг/м<sup>3</sup>.

## 2. Практическая часть

### Задача 4.1

Чувствительность емкостного уровнемера 10 нФ/м. Определить изменение реактивного сопротивления конденсатора при измерении уровня от 0,5 до 1 м, если измерительная цепь подключается к источнику переменного ток напряжения частотой 10 кГц. Емкостью соединительных линий пренебречь.



### Решение

Емкость уровнемера определяется по формуле:

$$C = C_1 + C_0 = (l \cdot \varepsilon_{a2} + (l_0 - l) \cdot \varepsilon_{a1}) \cdot \frac{2\pi}{\ln\left(\frac{D_1}{D_2}\right)}$$

Используя значение чувствительности, определим емкость конденсатора для 0,5 и 1 метра:

$$C_{0,5} = 0,5 \cdot 10 = 5 \text{ нФ} \quad C_1 = 1 \cdot 10 = 10 \text{ нФ}.$$

Определим реактивное сопротивление по формуле:

$$X_{C1} = \frac{1}{2\pi\nu C} = \frac{1}{2\pi \cdot 10^4 \cdot 5 \cdot 10^{-9}} = 3184 \text{ Ом};$$

$$X_{C2} = \frac{1}{2\pi\nu C} = \frac{1}{2\pi \cdot 10^4 \cdot 10 \cdot 10^{-9}} = 1592,3 \text{ Ом},$$

где  $\nu$  – частота, Гц.

Таким образом изменение сопротивления составит от 1592 до 3184 Ом.

#### Задача 4.2

Начальная емкость конденсатора емкостного уровнемера при отсутствии жидкости в нем 50 пФ. Определить значения емкости при значениях уровня  $0,5l_0$  для жидкости с относительной диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon = 8$ .  $l_0 = 4$  м,  $D_1/D_2 = 5$ .

#### Решение

Электрические преобразователи уровня (емкостные) основаны на использовании емкостного метода, т.е. зависимости конденсаторного устройства от уровня заполняющей его жидкости. Устройство емкостного уровнемера представляет собой параллельно соединенные цилиндрические конденсаторы  $C_1$  (образован частью электродов и жидкостью, уровень которой изменяется) и  $C_0$  (образован частью электродов и воздухом). Емкость уровнемера определяется по формуле:

$$C = C_1 + C_0 = (l \cdot \varepsilon_{a2} + (l_0 - l)\varepsilon_{a1}) \frac{2\pi}{\ln \frac{D_1}{D_2}},$$

где  $l_0$  и  $l$  – полная длина цилиндра (резервуара) и длина его, заполненная жидкостью, м;  $\varepsilon_{a1}$  и  $\varepsilon_{a2}$  – абсолютные диэлектрические проницаемость воздуха и жидкости, Ф/м;  $D_1$  и  $D_2$  – диаметры внешнего цилиндра (резервуара) и внутреннего цилиндра (электрода), м.

$$C_0 = (l_0 - l) \cdot \varepsilon_{a1} \cdot \frac{2\pi}{\ln \left( \frac{D_1}{D_2} \right)} = \frac{2\pi}{\ln \left( \frac{D_1}{D_2} \right)} \cdot l_0;$$

$$C_1 = (l_0 - l) \cdot \varepsilon_{a2} \cdot \frac{2\pi}{\ln \left( \frac{D_1}{D_2} \right)} = \frac{2\pi}{\ln \left( \frac{D_1}{D_2} \right)} \cdot (l_0 - 0,5l_0) \cdot 8 = \frac{2\pi}{\ln \left( \frac{D_1}{D_2} \right)} \cdot 4l_0;$$

$$C = C_1 + C_0 = \frac{2\pi}{\ln\left(\frac{D_1}{D_2}\right)} \cdot (l_0 + 4l_0) = \frac{2\pi}{\ln\left(\frac{D_1}{D_2}\right)} 5l_0 = \frac{10\pi}{\ln\left(\frac{D_1}{D_2}\right)} \cdot l_0;$$

$$C = \frac{10\pi}{\ln(5)} \cdot 4 = 78 \text{ пФ.}$$

### Задачи для самостоятельного решения

1. В поплавковом уровнемере масса поплавок 2,8 кг, объем 420 см<sup>3</sup>, масса противовеса 2 кг. При измерении верхнего уровня поплавок находится на расстоянии 5 м от дна резервуара, а противовес – на расстоянии 2 м, масса троса 0,2 кг на погонный метр. Определить, какая часть объема поплавок будет погружена, если плотность измеряемой жидкости 950 кг/м<sup>3</sup>.

2. Масса поплавок уровнемера 3 кг. При измерении нижнего уровня он находится на расстоянии 0,2 м от дна резервуара, а противовес массой 2 кг – на высоте 3,5 м. Масса троса 0,2 кг на погонный метр. Определить наименьший объем, который должен иметь поплавок, если плотность жидкости 1000 кг/м<sup>3</sup>.

3. Определить передаточное число редуктора поплавкового уровнемера, одно из колес которого связано с барабаном, наматывающим трос, другое – со стрелкой указателя, если при перемещении поплавок от 0 до 1,5 м угол поворота указателя равен 270°. Диаметр барабана 100 мм.

4. Контактно-механический уровнемер рассчитан на измерение уровня до 5 м. Сколько оборотов сделает электромеханическая лебедка диаметром 0,5 м? Выбрать коэффициент передачи редуктора, связывающего лебедку с сельсином-датчиком, если его поворот должен быть не более 180°.

5. Мембранный сигнализатор (рис. 4.2) используется для сигнализации верхнего уровня жидкости плотностью  $\rho_V = 950 \text{ кг/м}^3$ . При какой толщине слоя над осью мембраны включится сигнализатор, если давление срабатывания мембраны 500 Па.

6. Показания дифманометра пьезометрического уровнемера 5 кПа. Определить значения уровня жидкости номинальной плотностью  $\rho_V = 880 \text{ кг/м}^3$  в резервуаре.

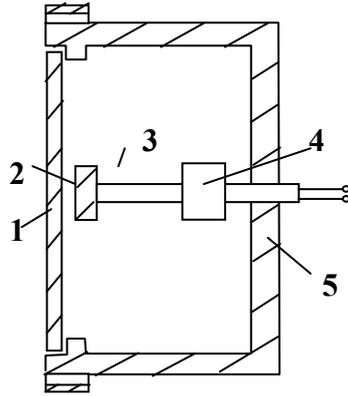


Рис. 4.2. Мембранный сигнализатор уровня:  
 1 – мембрана; 2 – диск; 3 – возвратная пружина;  
 4 – микропереключатель; 5 – корпус

7. Для измерения уровня жидкости в закрытом резервуаре используют дифференциальный манометр. Определить показания прибора при изменении уровня от 1 до 3 м, если плотность жидкости  $\rho_V = 1050 \text{ кг/м}^3$ , давление воздуха в резервуаре 0,2 МПа. Найти давления в плюсовой и минусовой трубках манометра.

8. Для измерения уровня жидкости плотностью  $\rho_V = 1050 \text{ кг/м}^3$  в открытом резервуаре используют дифференциальный манометр, минусовая трубка которого соединена с атмосферным воздухом. Определить показания манометра при нулевом уровне и максимальном уровне воды 5 м, если он расположен ниже нулевого уровня резервуара на 3 м.

9. Для измерения уровня воды используют емкостной уровнемер. Длина цилиндра 1,5 м, диаметры 40 мм и 5 мм. Определить наибольший диапазон изменения емкости конденсатора. Абсолютная диэлектрическая проницаемость воздуха  $8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Кл/В}\cdot\text{м}$ , воды  $274,4 \cdot 10^{-12} \text{ Кл/В}\cdot\text{м}$ .

10. Начальная емкость конденсатора емкостного уровнемера при отсутствии жидкости в нем 60 пФ. Определить значения емкости при значениях уровня  $0,75l_0$  для жидкости с относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon = 5$ ,  $l_0 = 2 \text{ м}$ ,  $D_1/D_2 = 3$ .

11. Чувствительность емкостного уровнемера 20 нФ/м. Определить изменение реактивного сопротивления конденсатора при изменении уровня от 0,7 до 1,5 м, если измерительная цепь подключается к источнику переменного ток напряжения частотой 14 кГц. Емкостью соединительных линий пренебречь.

## Лабораторная работа 5 «Измерение влажности воздуха и газа»

Цель занятия: изучение способов измерения влажности.

### 1. Теоретическая часть

Влажность воздуха зависит от содержания в нем водяных паров. Для характеристики влажности используют следующие понятия: абсолютная, максимальная, относительная влажность, дефицит насыщения, физиологический дефицит насыщения, точка росы.

**Влажность** – показатель содержания воды в физических телах или средах (обычно измеряется в  $\text{г/м}^3$ ).

**Абсолютная влажность** – количество водяного пара в единице объема воздуха (обычно измеряется в  $\text{г/м}^3$ ).

**Максимальная влажность** – количество водяного пара, которое может содержаться в воздухе при определенной температуре в термодинамическом равновесии (в  $\text{г/м}^3$ ). При повышении температуры воздуха максимальная влажность увеличивается, при понижении температуры происходит конденсация пара.

**Относительная влажность** – отношение абсолютной влажности к максимальной, выраженное в процентах. Относительная влажность в помещениях, где живут и работают люди, считается нормальной в диапазоне 40-60%.

**Дефицит насыщения (дефицит влажности)** – разность между максимальной и абсолютной влажностью.

**Точка росы** – температура, при которой воздух максимально насыщен водяными парами.

Измерение влажности воздуха может проводиться с помощью различных приборов. Абсолютная влажность может быть определена с помощью психрометров. Существует 2 его вида: аспирационный психрометр Ассмана и стационарный психрометр Августа.

Психрометр состоит из двух одинаковых термометров, резервуар одного из которых обернут легкой гигроскопичной тканью, увлажняемой дистиллированной водой перед измерением, а второй остается сухим.

Стационарный психрометр Августа используется в стационарных условиях, исключая воздействие на него ветра и лучистого тепла.

Он состоит из двух спиртовых термометров. На основании их показаний абсолютная влажность определяется по таблицам или по формуле:

$$K = f - \alpha \cdot (t_c - t_b) \cdot B, \quad (5.1)$$

где:  $K$  – абсолютная влажность воздуха при данной температуре, мм рт. ст.;  $f$  – максимальная влажность воздуха при температуре влажного термометра, мм рт.ст.;  $\alpha$  – психрометрический коэффициент, равный при несильном движении воздуха 0,001;  $t_c$  и  $t_b$  – температура сухого и влажного термометров, °С;  $B$  – атмосферное давление в момент измерения, мм рт. ст.

Наиболее широко для измерения абсолютной влажности как в помещении, так и вне его используются переносные аспирационные психрометры Ассмана, имеющие защиту от ветра и тепловой радиации.

Психрометр состоит из двух ртутных термометров (имеющих шкалу от -30 до +50 °С), которые заключены в общую оправу, а их резервуары – в двойные никелированные металлические трубки защиты от лучистого тепла. Вмонтированный в головку прибора вентилятор с часовым механизмом просасывает воздух вдоль термометров с постоянной скоростью 2 м/с.

Абсолютная влажность воздуха в этом случае вычисляется по формуле:

$$K = \frac{f - 0,5 \cdot (t_c - t_b) \cdot B}{755}. \quad (5.2)$$

Относительная влажность воздуха (в %) рассчитывается по формуле:

$$\varphi = \frac{K \cdot 100}{f}, \quad (5.3)$$

где  $P$  – относительная влажность, %,  $\varphi$  – максимальная влажность воздуха при температуре сухого термометра, мм рт. ст.

Непосредственно относительная влажность может быть измерена гигрометром. Обезжиренный человеческий волос в гигрометре натянут вдоль рамы прибора и прикреплен к стрелке. Используется свойство волоса изменять свою длину в зависимости от влажности. При изменении степени его натяжения стрелка перемещается по шкале, отградуированной в процентах. Относительная влажность измеряется обычно в центре помещения.

Для непрерывной графической регистрации относительной влажности воздуха за определенный период времени используются самопишущие приборы — гигрографы (суточный или недельный) типа М-21 (диапазон измерений от 30 до 100% при температурах от –30 до +45 °С), в которых датчиком служит натянутый в рамке пучок обезжиренных человеческих волос.

### ***Психрометрический метод***

Он основан на использовании зависимости относительной влажности воздуха от разности температур сухого и влажного термометров. Для определения влажности используется психрометрическая таблица (приложение Г).

Приборы, основанные на психрометрическом методе, оснащены двумя одинаковыми термометрами (термосопротивлениями), один из которых постоянно влажный. При этом используются различные мостовые схемы (рис. 5). Условие равновесия моста (рис. 5) определяется по формуле:

$$(R_M + R + R_X)R_4 = (R_C + R - R_X)R_2, \quad (5.4)$$

где  $R_M$  – сопротивление влажного термометра (термосопротивление);  
 $R_C$  – сопротивление сухого термометра (термосопротивление).

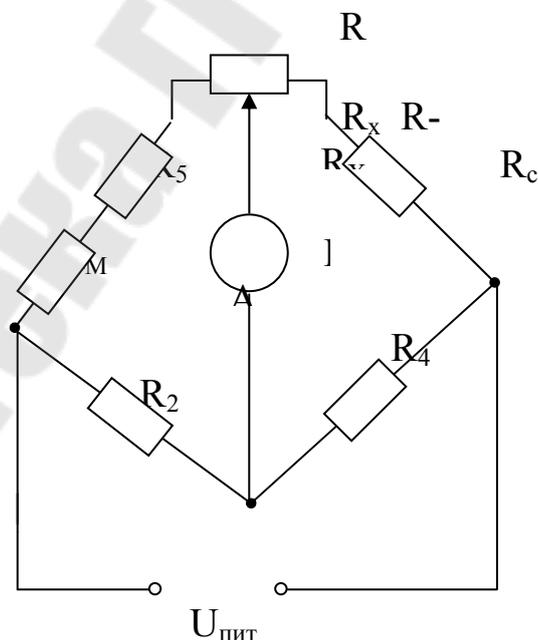


Рис. 5.1. Мостовая схема психрометра

### Конденсационный метод

Конденсационный метод основан на определении относительной влажности по известным температурам воздуха (газа) и точки росы. Эта точка контролируется визуально или с помощью фотоэлементов. При расчетах можно пользоваться следующим выражением для относительной влажности:

$$f = \frac{a + T - b(T - T_d)}{a + T + b(T - T_d)} \cdot 100\%, \quad (5.5)$$

где  $T$  и  $T_d$  - температура воздуха и точки росы, К;  $a$  и  $b$  - постоянные коэффициенты (в диапазоне температур воздуха 293 – 313К,  $a = 105$ ,  $b = 3,9$ ).

Одна из схем гигрометра приведена на рис.5.2.

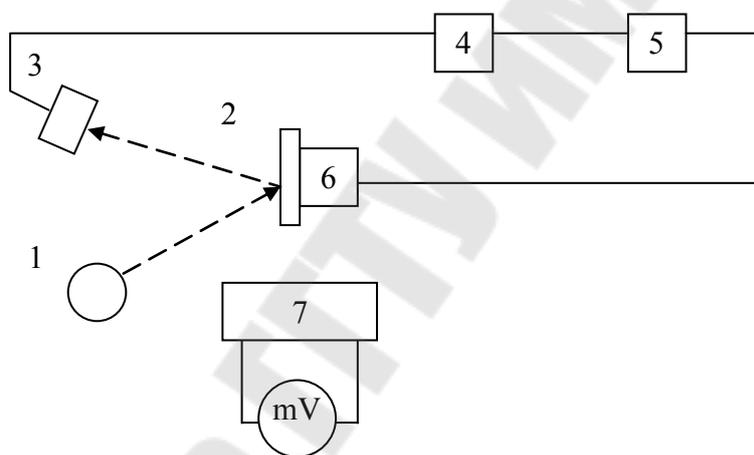


Рис. 5.2. Фотоэлектрический гигрометр:

- 1 – источник света; 2 – зеркальце; 3 – фотоэлемент; 4 – усилитель;
- 5 – реле; 6 – полупроводниковая батарея;
- 7 – термоэлектрический преобразователь

Охладителем является полупроводниковая термоэлектрическая батарея 7, работающая по принципу эффекта Пельтье: повышение температуры одного спая и понижение температуры другого спая при прохождении тока в термоэлектрической цепи. К холодному спая полупроводникового элемента батареи припаяно металлическое зеркальце 2. Для измерения температуры зеркальца к его поверхности припаян термоэлектрический преобразователь, подключенный к милливольтметру.

В отсутствии на поверхности зеркала конденсата, падающий на него от источника света  $I$  световой поток отражается и попадает на фотоэлемент 3. В цепи фотоэлемента проходит фототок, который усиливается электронным усилителем и управляет работой реле 5. При этом через термоэлемент полупроводниковой батареи 6 проходит ток и зеркало охлаждается. Появление конденсата на поверхности зеркала приводит к рассеянию светового потока, уменьшающего освещенность фотоэлемента, уменьшению фототока и переключению реле, при котором питание термоэлемента отключается. Так как окружающая температура выше температуры зеркала, конденсат с поверхности зеркала быстро испаряется, и реле вновь включает в работу термоэлемент полупроводниковой батареи.

### ***Емкостной метод***

Емкостные влагомеры работают по принципу изменения емкости конденсатора, в котором измеряемое вещество играет роль диэлектрика, с изменением его влажности.

Емкость цилиндрического конденсатора определяется по формуле

$$C_X = \frac{\varepsilon_a \cdot 2\pi l}{\ln \frac{D_1}{D_2}} \quad (5.4)$$

где  $\varepsilon_a$  – абсолютная диэлектрическая проницаемость измеряемого вещества, Ф/м;  $l$  – высота слоя измеряемого вещества, м;  $D_1$  и  $D_2$  – внешний и внутренний диаметры измерительного конденсатора, м.

## **2. Практическая часть**

### **Задача 5.1**

При измерении относительной влажности с помощью гигрометра температура точки росы равна  $10^\circ\text{C}$ . Определить значение влажности при температуре воздуха  $25^\circ\text{C}$ .

### **Решение**

Температура точки росы, равная  $10^\circ\text{C}$ , означает, что относительная влажность при этой температуре равна 100%. Из справочных

материалов приложения Д находим количество паров, содержащихся при данных условиях в воздухе. Масса паров при 10 °С составит 9,356 г/м<sup>3</sup>.

Для 25 °С этой же массе паров будет соответствовать влажность 41%:

$$\varphi = \frac{m_{\text{пара}10}}{m_{\text{пара}25}} \cdot 100\% = \frac{9,356}{22,83} \cdot 100\% = 40,98 \approx 41\%.$$

### Задачи для самостоятельного решения

1. Погрешности измерения термометров составляют  $\pm 1$  °С. Определить погрешность измерения влажности при действительной температуре сухого термометра 23 °С и влажного 18 °С (Приложение Г).

2. В качестве чувствительных элементов психрометра использованы медные терморезисторы ТСМ 100М. При температуре сухого термометра 25 °С равновесие моста произошло при сопротивлениях  $R_X = 2$  Ом,  $R_5 = R$ ,  $R_2 = R_4$ . Найти относительную влажность воздуха (рис. 5.1, Приложение Г).

3. Для измерения температуры зеркальца гигрометра использовалась термопара типа ТПП с термостатированием холодных спаев при 0°С. Определить относительную влажность воздуха с температурой 20°С, если напряжение термопары 64 мкВ.

4. Температура зеркальца гигрометра 10 °С измерена с точностью  $\pm 0,5$  °С. Определить относительную погрешность измерения относительной влажности воздуха при температуре 20 °С.

5. При изменении влажности от 12 до 18% диэлектрическая проницаемость изменилась от 4,5 до 15. Определить изменение емкости влагомера, если  $l = 100$  мм, отношение  $D_1/D_2 = 1,5$ . Найти емкость незаполненного конденсатора.

6. Температура в изолированном помещении повысилась от 2 до 20 °С. Определить относительную влажность, если изначально она составляла 100 %.

## Лабораторная работа 6 «Расчет органа регулирования расхода воды»

**Цель:** рассчитать регулирующий орган для регулирования расхода воды.

### 1. Теоретическая часть

**Регулирующий орган (РО)** – элемент в цепи воздействий, оказывающий непосредственное влияние на управляемый объект. Это воздействие может осуществляться изменением количества энергии (вещества), проходящего через объект, либо путем изменения характеристик (режима) объекта. В первом случае на объект влияют распределительные органы, во втором – регулирующие устройства.

Функциональные и конструктивные признаки регулирующих органов зависят от вида рабочей среды (жидкость, газ, электроэнергия и т. п.) и назначения объекта.

Основные характеристики регулирующих органов:

- условный проход  $D_y$  – номинальный внутренний диаметр входного патрубка;
- условное давление  $P_y$  – наибольшее рабочее давление, допускаемое при заданных температуре рабочей среды и материале арматуры;
- условный ход  $S_y$  – ход затвора РО от полного открытия до полного закрытия (для поворотных РО – угол поворота  $\alpha_y$ );
- коэффициент местного сопротивления при полном открытии  $\zeta$ ;
- степень открытия  $m$  – отношение текущего значения хода  $s$  или угла поворота  $\alpha$  к условному:  $m = s/s_y = \alpha/\alpha_y$ ;
- пропускная способность  $K$  – массовый расход жидкости с плотностью  $\rho = 1 \text{ т/м}^3$  при перепаде давления  $\Delta p = 0,1 \text{ МПа}$ ;
- расходная характеристика  $G = f(s)$  или  $G = f(m)$  – зависимость расхода от положения затвора регулирующего органа. На рис. 6.1 показаны типичные формы расходных характеристик (Р – равнопроцентная, П – параболическая и Л – линейная), из которых наилучшее качество регулирования обеспечивают линейная и равнопроцентная. В ряде случаев используется пропускная характеристика  $K = f(m)$ ;
- конструктивная характеристика  $F = f(m)$  – зависимость площади проходного сечения от степени открытия, которая определяет

форму расходной характеристики. Выбор вида конструктивной характеристики называют *профилированием* регулирующего органа.

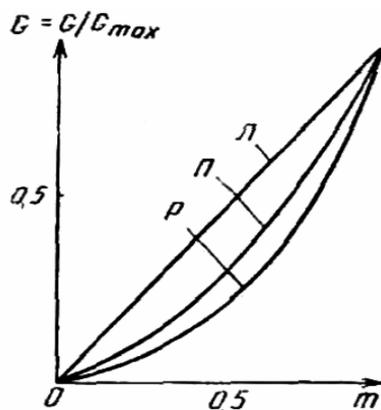


Рис. 6.1. Формы расходных характеристик

Конструктивная характеристика выражает только особенности конструкции данного регулирующего органа, не связывая их с особенностями потока, протекающего через него, а также с особенностями самого вещества и регулируемого объекта.

В САР работа регулирующего органа эквивалентна обычному усилительному звену, где входом является перемещение штока регулирующего органа, а выходом – изменение расхода через орган. Такая статическая характеристика регулирующего органа называется расходной характеристикой дроссельных регулирующих органов.

Расходная характеристика строится при следующих условиях:

- перепад давления в регулируемом участке является величиной постоянной;
- регулируемая среда несжимаема;
- регулируемая среда невязкая;
- условный коэффициент сопротивления линии и коэффициенты сопротивления регулирующего органа не зависят от расходов.

В зависимости от конструкции затвора РО принято классифицировать **по характеру перемещения подвижных элементов** затвора на *арматуру с перемещением затвора параллельно потоку* (клапаны и золотники), *перпендикулярно к потоку* (шиберные задвижки), *с вращением затвора* (поворотные заслонки, краны) и *со сжатием проходного канала* (шланговые и диафрагмовые клапаны).

Двухседельные или двухпоточные конструкции обладают меньшим сопротивлением и почти разгружены от перепада давлений на затвор, чем уменьшается требуемое перестановочное усилие. Регу-

лирующий орган может работать по схеме НО (нормально открытый) и НЗ (нормально закрытый), критерием служит отсутствие управляющего воздействия.

Для газов при статических давлениях до 10000 Па применяются шиберы, поворотные заслонки и многостворчатые жалюзийные клапаны. Шиберы находят меньшее применение по сравнению с поворотными заслонками из-за значительных усилий, требуемых для их перемещения, а также из-за больших перемещений штока, необходимых для перестановки шибера из одного крайнего положения в другое.

Шибер, кроме того, как регулирующий орган менее надежен в работе вследствие трудностей, возникающих при уплотнениях сальника. Обычно с течением времени сальники теряют герметичность, что весьма нежелательно, особенно при транспортировании вредных веществ.

Поворотные заслонки в отличие от шиберов не имеют указанных недостатков: силы трения в осях при вращательном движении незначительны, легко осуществляется уплотнение осей, и перепад давлений, действующий на поворотные лопасти, в значительной степени уравнивается. Необходимое усилие для их перестановки существенно меньше, чем у шиберов. Однолопастные поворотные заслонки находят все большее применение, их начинают использовать уже при давлениях среды в несколько десятков атмосфер. Отмечаются еще и такие преимущества поворотных заслонок, как малое сопротивление при открытом положении, большая пропускная способность, чем у клапанов того же условного прохода, отсутствие вибрации и шума при работе, малая чувствительность к засорениям, небольшие масса и размеры заслонок по сравнению с клапанами.

Существенным преимуществом поворотных заслонок оказывается и то, что расходная характеристика их при регулировании подачи горячей воды в теплообменные аппараты значительно лучше, чем у выпускных клапанов.

Многостворчатые жалюзийные клапаны, применяемые для регулирования расходов в вентиляции, по существу, представляют собой многолопастные поворотные заслонки. Они имеют практически те же преимущества, что и однолопастные поворотные заслонки.

Для регулирования потоков пара, воды и воздуха при статических давлениях выше 10 000 Па применяются в основном клапаны и краны. Регулирующие краны не нашли широкого распространения,

более часто применяются клапаны. Они бывают односедельными либо двухседельными. Недостатком односедельных клапанов является возникающее усилие от перепада давлений среды, обычно выталкивающее шток клапана при его закрытии.

Это выталкивающее усилие при закрытом клапане определяется как произведение площади плунжера на разность давлений среды до и после клапана. Оно может достигать очень больших величин и требует дополнительных затрат энергии на работу исполнительного механизма. Обычно односедельные клапаны изготавливаются только размером до 50 мм. Выпускаемые двухседельные клапаны более уравновешены, так как перепад давления среды воздействует в равной степени на верхнюю и нижнюю части плунжера.

Клапаны всех типов делятся на клапаны прямого и обратного действия. В клапанах прямого действия при движении плунжера вниз закрывается проходное отверстие, а в клапанах обратного действия – наоборот. Конструкция клапанов предусматривает возможность путем перевертывания плунжера при сборке, не меняя деталей, собрать клапан любого действия.

Необходимо отметить, что регулирующие органы должны устанавливаться на прямолинейных участках трубопровода с таким условием, чтобы местные сопротивления, искажающие поток, были расположены не ближе 10...15 диаметров. При меньшей длине прямолинейного участка рекомендуется перед дроссельными регулирующими органами ставить успокоители потока: сетки, трубчатые струевыпрямители и т. п. Особенно трудно, но необходимо предусматривать такие меры в установках кондиционирования воздуха, где потоки смешиваются, разделяются и количественно регулируются (регулирование расходов).

## 2. Практическая часть

**Данные для расчета:** среда – вода; максимальный объемный расход –  $Q_{\max} = 140 \text{ м}^3/\text{ч}$ , перепад давлений при максимальном расходе –  $\Delta P_{p,o} = 16 \text{ кгс}/\text{см}^2$ , температура –  $\theta = 90^\circ\text{C}$ ; плотность –  $\rho = 1 \text{ г}/\text{см}^3$ , абсолютное давление до регулирующего органа –  $P_1 = 18 \text{ кгс}/\text{см}^2$ ; абсолютное давление насыщенных паров –  $P_n = 0,7 \text{ кгс}/\text{см}^2$  при  $90^\circ\text{C}$ ; кинематическая вязкость –  $\nu = 0,00328 \text{ см}^2/\text{с}$  при  $90^\circ\text{C}$ .

## Методика расчета

1. По уравнению определяем максимальную пропускную способность  $K_{v\max}$ , в зависимости от  $Q_{\max}$  и  $\Delta P_{p.o.}$ :

$$K_{v\max} = Q_{\max} \cdot \sqrt{\frac{c}{\Delta P_{p.o.}}} = 140 \cdot \sqrt{\frac{1}{16}} = 35 \text{ м}^3/\text{ч};$$

$$K_{v\max} = Q_{\max} \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a},$$

где  $Q_{\max}$  – максимальный объемный расход, м<sup>3</sup>/ч;  $\rho$  – плотность жидкости, г/см<sup>2</sup>;  $\Delta P_{p.o.}$  – перепад давления на регулирующем органе, кгс/см<sup>2</sup>.

2. Предварительно по каталогу (табл. 1) выбираем двухседельный регулирующий орган, с условным проходом:

$$K_{ny} = 40 \approx 1,2 K_{v\max} = 42 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Таблица 6.1

**Условные пропускные способности регулирующих органов**

| Диаметр условного прохода, $D_y$ , мм | Значение $K_{vy}$ , м <sup>3</sup> /ч, регулирующего органа |                  |             |
|---------------------------------------|---|------------------|-------------|
|                                       | клапанных   |                  | заслоночных |
|                                       | односедельных   | двухседельных    |             |
| 6                                     | 0,25  | –                | –           |
| 10                                    | 1,5   | –                | –           |
| 15                                    | 0,16; 0,4; 1,0; 3,2   | 3,2; 4; 5; 6,3   | –           |
| 20                                    | 1,6; 2,5; 4,0; 5,0  | 6,3; 8; 10       | –           |
| 25                                    | 5; 6,3; 8; 10   | 6,3; 8; 10; 16   | –           |
| 32                                    | 12  | 16; 25           | –           |
| 40                                    | 20  | 25; 32; 40       | –           |
| 50                                    | 32  | 25; 32; 40; 63   | 60          |
| 65                                    | 50  | 63; 100          | 100         |
| 80                                    | 80  | 63; 80; 100; 160 | 160         |
| 100                                   | 125   | 160; 250         | 250         |
| 125                                   | 200   | 250; 400         | 400         |
| 150                                   | 320   | 400; 630         | 600         |
| 200                                   | 500   | 630; 1000        | 1000        |
| 250                                   | –   | 1000; 1600       | 1600        |

3. Выбранный регулирующий орган проверяют на влияние вязкости протекающей через него жидкости. Для этого рассчитывают критерий Рейнольдса ( $R_e$ ) по формуле

$$R_e = 3530 \frac{Q_{\max}}{v D_y} = \frac{3530 \cdot 140}{0,00328 \cdot 50} = 3 \cdot 10^6,$$

где  $Q_{\max}$  – максимальный объемный расход, м<sup>3</sup>/ч;  $v$  – коэффициент кинематической вязкости, м<sup>2</sup>/с;  $D_y$  – условный проход регулирующего органа, мм.

Так как полученное значение  $R_e > 2000$ , то влияние вязкости на расход не учитывается и выбранный регулирующий орган проверяется на возможность возникновения кавитации.

4. Для проверки регулирующего органа на возможность возникновения кавитации определяем:

а) коэффициент сопротивления выбранного регулирующего органа:

$$\zeta_y = \frac{25,4 F_y^2}{K^2_{wy}} = \frac{25,4 \cdot 3,14^2 \cdot 5^4}{4^2 \cdot 40^2} = 6,12;$$

где  $F_y = \pi D_y^2 / 4$  – площадь сечения входного патрубка регулирующего органа, см<sup>2</sup>;

б) по кривой 1, изображенной на рис. 1, находим коэффициент кавитации  $K_c = 0,51$ ;

в) определяем перепад давлений, при котором возникает кавитация:

$$\Delta P_{\text{кав}} = K_c (P_1 - P_H) = 0,51(18 - 0,7) = 8,8 \text{ кгс/см}^2.$$

5. Заданный перепад давлений  $\Delta P_{\text{р.о.}}$  больше  $\Delta P_{\text{кав}}$ , следовательно, выбранный регулирующий орган будет работать в кавитационном режиме и не обеспечит заданный расход жидкости.

Если по условиям технологического процесса невозможно снизить  $\Delta P_{\text{р.о.}}$  до  $\Delta P_{\text{кав}}$  или увеличить  $\Delta P_{\text{кав}}$  до  $\Delta P_{\text{р.о.}}$ , то необходимо выбрать ближайший больший регулирующий орган, для которого вновь определяется  $\zeta_y$ ,  $K_c$  и  $\Delta P_{\text{кав}}$ .

В данном случае выбираем двухседельный регулирующий орган с условным проходом  $D_y = 80$  мм и  $K_{vy} = 63$  м<sup>3</sup>/ч, для которого

$$\zeta_y = \frac{25,4 F_y^2}{K_{\text{ну}}^2} = \frac{25,4 \cdot 3,14^2 \cdot 8^4}{16^2 \cdot 63^2} = 16,2;$$

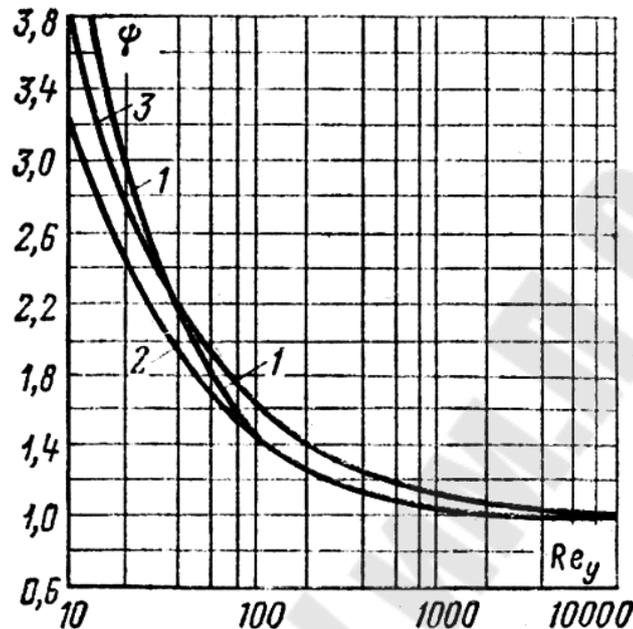


Рис. 6.2. Зависимость коэффициента кавитации  $K_c$  и  $K_{c\max}$  от  $\zeta_y$ :  
 1 –  $K_c$  для односедельных и двухседельных регулирующих органов при подаче жидкости на затвор;  
 2 –  $K_c$  и  $K_{c\max}$  для односедельных регулирующих органов при подаче жидкости под затвор;  
 3 –  $K_{c\max}$  для односедельных и двухседельных регулирующих органов при подаче жидкости на затвор

По кривой 3, изображенной на рис. 6.2, определяем коэффициент кавитации, соответствующий максимальному расходу –  $K_{c\max} = 0,52$ .

$$\Delta P_{\text{кав.макс}} = K_{c\max} (P_1 - P_H) = 0,52(18 - 0,7) = 9 \text{ кгс/см}^2.$$

Определяем минимальную пропускную способность:

$$K_{\text{нмакс}} = Q_{\text{макс}} \cdot \sqrt{\frac{c}{\Delta P_{\text{р.о}}}} = 140 \cdot \sqrt{\frac{1}{9}} = 46,7 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Так как  $1,2 \cdot K_{\text{нмакс}} = 1,2 \cdot 46,7 = 56 \text{ м}^3/\text{ч}$  меньше  $K_{\text{vy}} = 63 \text{ м}^3/\text{ч}$ , то вновь выбранный регулирующий орган обеспечит заданный максимальный расход в условиях кавитации, и выбор регулирующего органа по пропускной способности считается законченным.

## Исходные данные по вариантам

| №<br>Варианта | $Q_{\text{макс}}$     | $\rho$                 | $D_y$       | $P_1$                    | $P_{\text{н}}$           | $\nu$                              |
|---------------|-----------------------|------------------------|-------------|--------------------------|--------------------------|------------------------------------|
|               | $\text{м}^3/\text{ч}$ | $\text{г}/\text{см}^3$ | $\text{см}$ | $\text{кгс}/\text{см}^3$ | $\text{кгс}/\text{см}^3$ | $\text{см}/\text{с} \cdot 10^{-3}$ |
| 0             | 140                   | 1                      | 5           | 18                       | 7                        | 3.28                               |
| 1             | 188.1                 | 1.15                   | 5.30        | 19.67                    | 4.64                     | 1.87                               |
| 2             | 177.3                 | 0.97                   | 4.51        | 11.94                    | 8.61                     | 3.12                               |
| 3             | 193.8                 | 0.91                   | 6.15        | 24.92                    | 10.28                    | 4.41                               |
| 4             | 126.4                 | 1.18                   | 6.92        | 25.66                    | 8.11                     | 3.28                               |
| 5             | 148.5                 | 0.83                   | 5.30        | 17.10                    | 8.61                     | 2.41                               |
| 6             | 79.6                  | 0.81                   | 7.34        | 21.49                    | 5.42                     | 2.07                               |
| 7             | 120.0                 | 1.03                   | 4.51        | 23.49                    | 5.42                     | 4.54                               |
| 8             | 153.0                 | 0.91                   | 2.84        | 20.26                    | 4.89                     | 4.54                               |
| 9             | 157.6                 | 0.94                   | 5.00        | 13.23                    | 6.00                     | 3.58                               |
| 10            | 140.0                 | 0.74                   | 5.63        | 25.66                    | 7.88                     | 2.96                               |
| 11            | 108.3                 | 0.76                   | 6.72        | 14.66                    | 8.61                     | 4.68                               |
| 12            | 92.9                  | 1.03                   | 2.84        | 22.14                    | 7.65                     | 4.68                               |
| 13            | 205.6                 | 1.13                   | 2.99        | 11.34                    | 9.41                     | 3.69                               |
| 14            | 182.7                 | 1.04                   | 5.46        | 12.57                    | 5.70                     | 4.68                               |
| 15            | 120.0                 | 0.78                   | 5.97        | 15.43                    | 8.61                     | 3.58                               |
| 16            | 153.0                 | 1.01                   | 6.15        | 20.26                    | 4.41                     | 4.28                               |
| 17            | 88.2                  | 0.94                   | 2.99        | 18.54                    | 8.87                     | 3.69                               |
| 18            | 144.2                 | 0.91                   | 5.30        | 19.67                    | 6.00                     | 4.16                               |
| 19            | 188.1                 | 1.03                   | 4.75        | 13.23                    | 9.13                     | 4.03                               |
| 20            | 153.0                 | 0.83                   | 2.84        | 13.93                    | 8.11                     | 4.68                               |
| 21            | 162.3                 | 1.00                   | 2.84        | 24.19                    | 9.13                     | 3.80                               |
| 22            | 108.3                 | 1.20                   | 2.99        | 18.00                    | 8.36                     | 3.58                               |
| 23            | 102.9                 | 0.89                   | 5.15        | 16.25                    | 7.88                     | 4.54                               |
| 24            | 120.0                 | 1.08                   | 2.99        | 25.66                    | 4.89                     | 4.82                               |
| 25            | 193.8                 | 0.74                   | 6.72        | 17.10                    | 8.36                     | 3.92                               |

## Лабораторная работа 7

### «Выбор регулятора температуры на основании расчетов»

**Цель:** освоить методику расчета и выбора автоматического регулятора.

#### 1. Теоретическая часть

Для обеспечения нормального хода технологических процессов, поддержания или изменения по заданным законам таких величин, как температура, давление, расход, уровень и другие применяют автоматические регуляторы или системы автоматического регулирования (управления).

*Автоматический регулятор* – это прибор или совокупность приборов, которые сравнивают текущее значение регулируемой величины с заданным значением, воздействуют на технологический процесс для поддержания текущего значения регулируемой величины равным заданному.

Регулирование представляет собой процесс, в ходе которого воздействуя с помощью автоматического регулятора на текущее значение регулируемой величины, стремятся сделать его равным заданному, то есть свести ошибки к нулю.

Для действующего объекта при наличии кривых разгона либо частотных характеристик или для вновь проектируемого объекта, выбор регуляторов следует производить на основании расчетов.

*Характер переходного процесса*, то есть показатель качества регулирования, определяется динамическими свойствами объекта, выбранным законом регулирования и коэффициентами управления этого закона (параметрами). На основании уравнений объектов и характеристик регуляторов выбирают соответствующий регулятор.

Оптимальные значения параметров настройки регуляторов можно определить по специальным кривым, а также путем расчета. Однако при практической работе найденные значения параметров настроек корректируются при наладке регулятора по кривым регистрации регулируемой величины.

*Позиционный регулятор* – регулятор, у которого воздействие на исполнительный механизм может иметь только определенное число

значений, соответствующих числу позиций отклонения регулируемой величины от заданного значения, а его знак зависит от знака отклонения. Наибольшее применение получили двух- и трехпозиционные регуляторы.

Чем больше предел пропорциональности, тем больше остаточное отклонение величины. Чем меньше предел пропорциональности, тем больше амплитуда затухающих колебаний и больше время переходного процесса, но остаточное отклонение величины становится меньше.

Для пропорциональных регуляторов увеличение емкости объекта благоприятно влияет на качество регулирования, при этом следует уменьшить пределы пропорциональности. При наличии запаздывания надо увеличить пределы пропорциональности. Чем больше скорость перемещения регулирующего органа, тем выше устойчивость и более высокое качество регулирования.

*Двухпозиционный регулятор* – регулятор, который при переходе регулируемой величины через заданное значение переводит регулируемый орган из одного крайнего положения в другое, типа «открыто – закрыто». Иногда двухпозиционный регулятор настраивают так, чтобы проходное отверстие регулирующего органа было частично открыто или закрыто в пределах фиксированных положений (в целях уменьшения возможного перерегулирования при двухпозиционном регулировании допускается частичное приоткрывание байпасного вентиля).

В *трехпозиционном регуляторе*, кроме крайних положений регулирующего органа, существует еще промежуточное положение (нейтральная зона).

В *многопозиционном регуляторе* таких промежуточных положений регулирующего органа несколько.

*Пропорциональный регулятор* (статический или регулятор с жесткой обратной связью) или сокращенно *П-регулятор* работает по такому принципу, когда регулируемый орган изменяет свое положение по такой же закономерности, по какой изменяется регулируемая величина; скорость перемещения регулирующего органа пропорциональна скорости изменения регулируемой величины.

Действие пропорционального регулятора заключается в том, чтобы «догнать» отклонившуюся величину и остановить ее, то есть прекратить ее дальнейшее изменение.

Для пропорционального регулятора диапазон регулируемой величины, в пределах которого происходит перемещение регулирующего органа из одного крайнего положения в другое, является *пределом пропорциональности*.

Пределом пропорциональности регулятора называется участок шкалы, выраженный в процентах длины всей шкалы, и в пределах которого изменения регулируемой величины вызывают перемещение регулирующего органа из одного крайнего положения в другое (предел пропорциональности также называют пределом дросселирования или степенью обратной связи).

Предел пропорциональности регулятора является величиной, обратной его чувствительности.

Чувствительность регулятора рассчитывается по формуле:

$$S = \frac{h_0 \cdot 100}{D \cdot L} \quad (7.1)$$

где  $h_0$  – полный ход регулирующего органа в мм;  $D$  – предел пропорциональности в %;  $L$  – длина шкалы регулятора в мм.

Необходимая величина пределов пропорциональности для П-регулятора:

$$D = \frac{V \cdot \tau \cdot 100}{\Delta P}, \quad (7.2)$$

где  $V$  – скорость изменения величины, выраженная в процентах приращения в единицу времени;  $\tau$  – время запаздывания;  $\Delta P$  – перемещение регулирующего органа в процентах полного хода, вызвавшего возмущение.

**Интегральный регулятор** (астатический или регулятор без обратной связи) или сокращенно **И-регулятор**. Регулирующий орган при отклонении регулируемой величины от заданного значения перемещается более или менее медленно и все время в одном направлении до тех пор, пока регулируемая величина не придет к заданному значению. Такие регуляторы бывают с постоянной или переменной скоростью перемещения регулирующего органа.

Положительной особенностью интегрального регулятора является то, что при поддержании величины на заданном значении регулирующий орган может занимать любое положение в пределах своего хода.

Недостатком регулятора является его замедленное действие.

Необходимая величина предела пропорциональности определяется по формуле:

$$D = \frac{V \cdot \tau \cdot 110}{\Delta P}. \quad (7.3)$$

**Пропорционально-интегральный регулятор** или сокращенно **ПИ-регулятор** (их также называют изодромными регуляторами или регуляторами с упругой обратной связью). Совмещают свойства пропорционального (статического) и интегрального (астатического) регуляторов и обеспечивают поддержание заданного значения регулируемой величины без остаточного отклонения. Регулирующий орган может занимать любое положение в пределах своего рабочего хода. Регулятор при поддержании величин на заданном значении может устанавливать регулирующийся орган в любом положении в пределах его хода.

В регуляторах пропорциональное действие осуществляется жесткой обратной связью, а изодромное действие – упругой обратной связью.

*Упругая обратная связь* (изодром) – обратная связь, которая характеризуется тем, что передаваемое ею воздействие существует только в переходном процессе и по его окончании исчезает.

Действие изодрома характеризуется скоростью и временем изодрома.

*Скорость изодрома* – это скорость, с которой регулирующийся орган перемещается под действием астатической составляющей регулятора и которая определяется перемещением регулирующего органа и выражается в процентах его хода в минуту после предварительного начального мгновенного перемещения регулирующего органа, вызванного действием изменения величины (пропорциональной составляющей):

$$r_a = \frac{\Delta h_{из}}{t_{из}}, \quad (7.4)$$

где  $\Delta h_{из}$  – изодромное перемещение регулирующего органа в процентах полного хода;  $t_{из}$  – время, в течение которого произошло это перемещение, в мин.

Параметром, характеризующим изодромное действие, является время изодрома – время, в течение которого происходит изодромное перемещение регулирующего органа на 1 % его хода при предвари-

тельном мгновенном перемещении его на 1 % за счет изменения величины:

$$t_i = \frac{\Delta h_{\text{из}}}{t_{\text{из}}}. \quad (7.5)$$

Пропорционально-дифференциальный и пропорционально интегрально-дифференциальный регуляторы или сокращенно соответственно **ПД- и ПИД-регуляторы** (или регуляторы с предварением). Эти регуляторы имеют дополнительное устройство, благодаря которому процесс регулирования протекает с учетом скорости изменения регулируемой величины. В этих регуляторах к пропорциональному действию добавляется дополнительное воздействие от скорости изменения регулируемой величины, которое заставляет перемещаться регулируемый орган с некоторым опережением, возрастающим с увеличением скорости изменения регулируемой величины. С уменьшением скорости изменения регулируемой величины это опережающее перемещение также уменьшается и полностью прекращается, когда регулируемая величина перестает изменяться.

Поскольку скорость изменения величины есть первая производная ее по времени, то такие регуляторы еще называют регуляторами по первой производной.

Приставка предварения дает воздействие на регулирующее устройство, которое заставляет регулируемый орган перемещаться с некоторым временным опережением, возрастающим с увеличением скорости изменения величины. С уменьшением скорости изменения величины уменьшается воздействие предварения и прекращается с прекращением изменения величины.

Время предварения равно:

$$t_{\text{пр}} = t_2 - t_1. \quad (7.6)$$

Обычно время предварения равно 0,1...10 мин.

Необходимую величину предела пропорциональности для этих регуляторов приближенно вычисляют по формуле:

$$D = \frac{V \cdot \tau \cdot 83}{\Delta P}. \quad (7.7)$$

Выбор типа регулятора необходимо всегда решать только для конкретного регулируемого объекта и совместно с учетом характеристик объекта.

Тот или иной регулятор выбирается по принципу от наиболее простого к более сложному. При этом следует всегда иметь в виду, что сложные автоматические регуляторы имеют более высокую стоимость и менее надежны в работе, чем простые.

Простоту и надежность регуляторов во многом определяют их динамические характеристики и вид потребляемой энергии на привод регулирующего органа. При выборе типа регулятора можно рекомендовать сначала подобрать необходимую и допустимую динамическую характеристику регулятора, а затем уже источник посторонней энергии, если он действительно нужен.

При отсутствии сведений о динамических свойствах проектируемого объекта выбор регуляторов следует производить по аналогии с действующими объектами или же на основании предположительных соображений о свойствах данного объекта, учитывая при этом критерии по выбору регуляторов.

И-регуляторы применяются в объектах с самовыравниванием, обладающих как малой, так и большой емкостью, с небольшим запаздыванием и при медленных изменениях нагрузки.

П-регуляторы применяются в объектах со средней емкостью, с небольшим запаздыванием и при небольших изменениях нагрузки. Пропорциональные регуляторы большей частью находят применение для одно- и реже двухъемкостных объектов. Для многоемкостных объектов пропорциональные регуляторы применяются ограниченно.

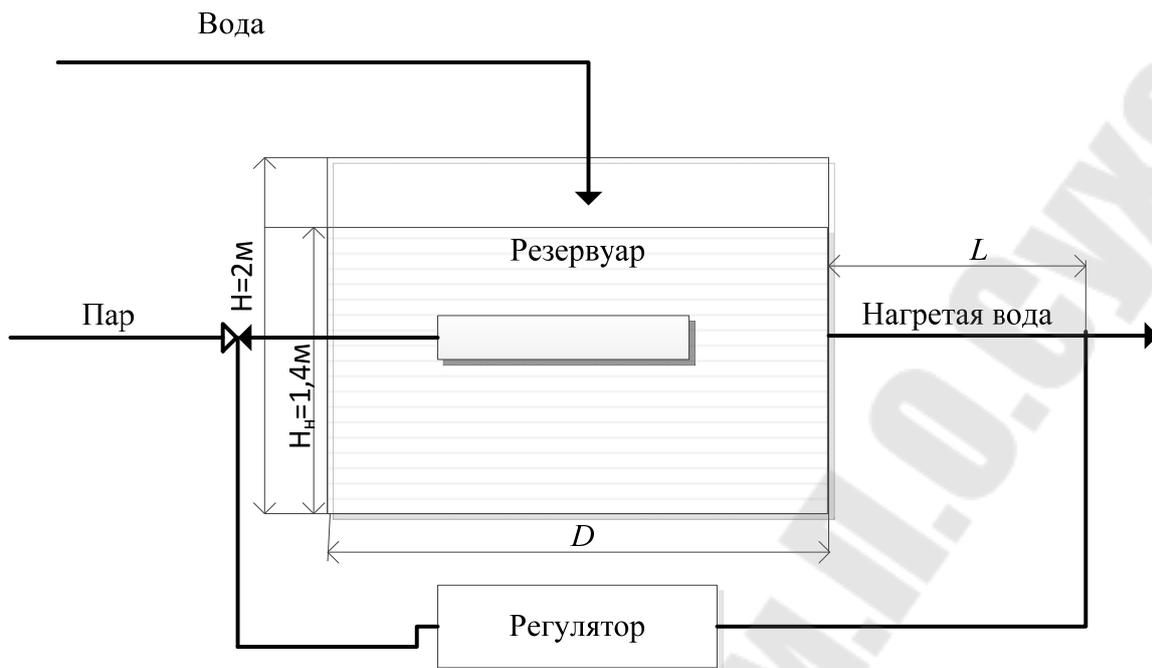
ПИ-регуляторы применяются в объектах с любой емкостью, с большим запаздыванием и большими, но медленными изменениями нагрузки. Эти регуляторы могут применяться для объектов со значительным запаздыванием (при  $\tau > 0,1T_0$ ) и для объектов многоемкостных.

ПД-регуляторы применяются в объектах со средней емкостью, при большом времени запаздывания и при малых изменениях нагрузки.

ПИД-регуляторы применяются в объектах с любой емкостью, с очень большим запаздыванием и при больших и резких изменениях нагрузки.

## 2. Практическая часть

Проведем расчет и выбора автоматического регулятора температуры воды, представленного на рисунке:



Р

ис. 7.1. Схема регулирования температуры воды путем смешения пара

Исходные данные:

$D$  – диаметр резервуара, м;

$\gamma$  – плотность жидкости в резервуаре,  $\text{кг/м}^3$ ;

$L$  – расстояние от резервуара до регулятора, м;

$\lambda_1$  – расход жидкости,  $\text{кг/с}$ ;

$\theta_1$  – температура подаваемой в резервуар воды,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$\theta_3$  – температура нагретой воды, выходящей из резервуара,  $^{\circ}\text{C}$ .

Для всех вариантов принять:

$H_H$  – высота жидкости в резервуаре – 1,4 м;

$G_{\min}$  – минимальный вес жидкости в резервуаре – 10 кг;

$G_1 = G_{\min} = 10$  кг;

$G_2$  – масса пара – 0,1 кг;

$C_1$  – коэффициент теплопотери – 0,999;

$v$  – скорость потока на выходе из резервуара – 1,5 м/с.

- 1.
- 2.

3. Определяем вес жидкости (кг) в резервуаре:

$$G = H_n \frac{\pi D^2}{4} \gamma = 1,4 \frac{3,14 \cdot 1,3^2}{4} \cdot 958,4 = 1780.$$

4. Определяем постоянную времени объекта (с):

$$T_0 = \frac{G(i_2 - \theta_3 C_3)}{G_{\min} i_2} = \frac{1780 \cdot (663,1 - 100 \cdot 1)}{10 \cdot 661,3} = 151.$$

5. Определяем время запаздывания объекта (с):

$$\tau_0 = \frac{L}{v} = \frac{10}{1,5} = 6,7.$$

6. Постоянная регулятора  $T_p = 14,8$ .

7. Время запаздывания регулятора  $\tau_p = 9,5$  (таблица).

8. Значение  $a$  (ккал/с) при возмущении по расходу вычисляется по формуле

$$a = (\theta_3 C_3 - \theta_1 C_1) \lambda_1 = (100 \cdot 1 - 35 \cdot 0,999) \cdot 2,5 = 162,6.$$

9. Значение  $a$  (ккал/с) при возмущении по температуре вычисляется по формуле

$$a = G_1 C_1 \lambda_2 = 12 \cdot 0,999 \cdot 12 \approx 144.$$

Принимаем значение  $a$  по расходу как большее из таблицы.

10. Определяем динамический коэффициент:

$$R_d = \frac{\Delta \sigma (G_{\min} - G_2) C_3}{a} = \frac{5(10 - 0,1)}{162,6} = 0,31.$$

11. Определяем общее время запаздывания (с):

$$\tau_{\text{об}} = \tau_0 + \tau_p = 6,7 + 9,5 = 16,2.$$

12. Вычислим отношение  $\frac{\tau_{\text{об}}}{T_{\text{об}}}$ :

$$\frac{\tau_{\text{об}}}{T_{\text{об}}} = \frac{16,2}{151} = 0,107.$$

13. На основании данных выбираем вид переходного процесса: с 20 % перерегулированием, что является рекомендуемым значением для стандартных процессов.

14. Выбираем регулятор по значениям  $\frac{\tau_{об}}{T_{об}} = 0,107$  и  $R_D = 0,31$ ,

используя рис. 7.2. На основании расчета приходим к выводу, что для данной схемы регулирования пригодны все регуляторы, кроме И-регулятора.

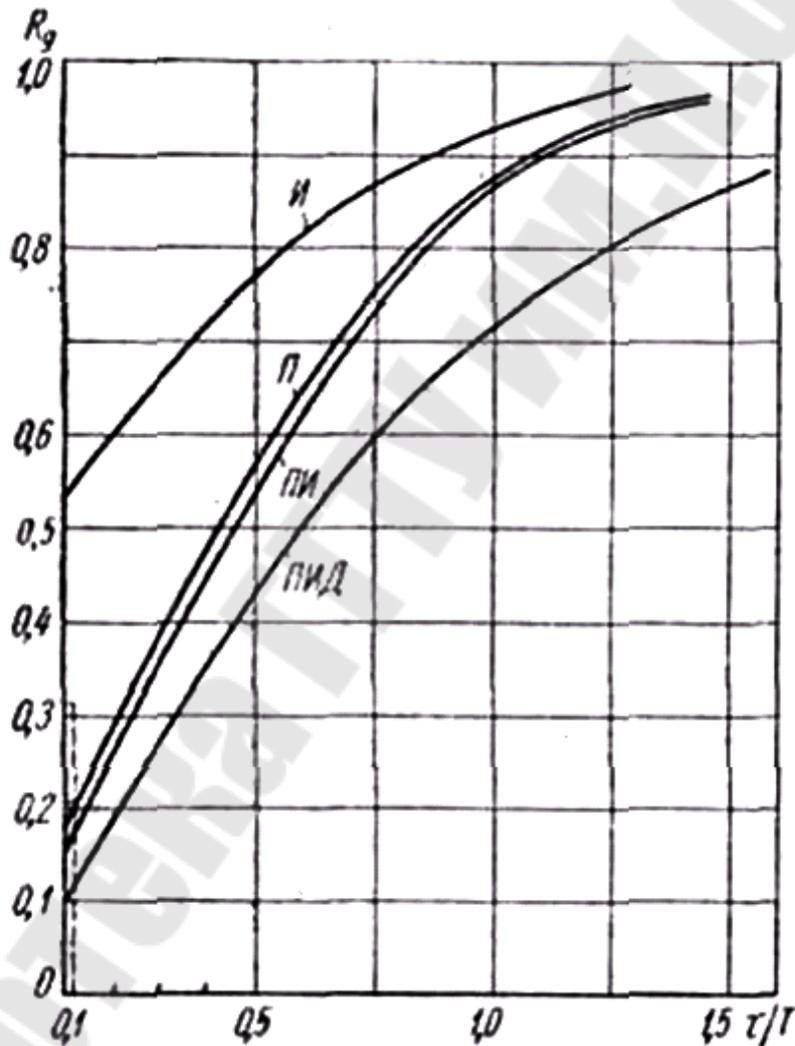


Рис. 7.2. Кривые выбора регулятора для переходного процесса с 20 % перерегулированием

Таблица 7.1

## Исходные данные

| № варианта | $D$  | $\gamma$ | $i_2$ | $\theta_1$ | $\theta_3$ | $C_3$ | $L$  | $\lambda_1$ | $\lambda_2$ | $R_d$ | $T_{об}$ | $\Delta\sigma$ |
|------------|------|----------|-------|------------|------------|-------|------|-------------|-------------|-------|----------|----------------|
| 1          | 1,02 | 783      | 497   | 29,5       | 85,1       | 0,61  | 8,9  | 2,11        | 8,51        | 0,235 | 150      | 4,43           |
| 2          | 1,04 | 799      | 508   | 29,8       | 86,8       | 0,63  | 9,0  | 2,13        | 8,69        | 0,240 | 156      | 4,52           |
| 3          | 1,06 | 815      | 518   | 30,1       | 88,6       | 0,65  | 9,2  | 2,15        | 8,86        | 0,245 | 162      | 4,61           |
| 4          | 1,08 | 832      | 528   | 30,4       | 90,4       | 0,68  | 9,4  | 2,17        | 9,04        | 0,250 | 169      | 4,71           |
| 5          | 1,11 | 849      | 539   | 30,7       | 92,2       | 0,70  | 9,6  | 2,19        | 9,23        | 0,255 | 175      | 4,8            |
| 6          | 1,13 | 866      | 550   | 31         | 94,1       | 0,73  | 9,8  | 2,22        | 9,42        | 0,260 | 182      | 4,9            |
| 7          | 1,15 | 884      | 562   | 31,3       | 96,0       | 0,75  | 10,0 | 2,24        | 9,61        | 0,266 | 190      | 5              |
| 8          | 1,18 | 902      | 573   | 31,6       | 98,0       | 0,78  | 10,2 | 2,26        | 9,80        | 0,271 | 197      | 5,1            |
| 9          | 1,20 | 920      | 585   | 32         | 100,0      | 0,80  | 10,4 | 2,28        | 10,00       | 0,277 | 205      | 5,2            |
| 10         | 1,22 | 939      | 597   | 32,3       | 102,0      | 0,83  | 10,6 | 2,31        | 10,21       | 0,282 | 213      | 5,3            |
| 11         | 1,25 | 958      | 609   | 32,6       | 104,0      | 0,85  | 10,8 | 2,33        | 10,42       | 0,288 | 222      | 5,4            |
| 12         | 1,27 | 977      | 621   | 32,9       | 106,0      | 0,88  | 11,0 | 2,35        | 10,63       | 0,294 | 231      | 5,51           |
| 13         | 1,30 | 996      | 634   | 33,3       | 108,1      | 0,91  | 11,2 | 2,38        | 10,85       | 0,300 | 240      | 5,62           |
| 14         | 1,33 | 1015     | 647   | 33,6       | 110,2      | 0,93  | 11,5 | 2,40        | 11,07       | 0,306 | 250      | 5,73           |
| 15         | 1,35 | 1035     | 660   | 34,3       | 112,4      | 0,96  | 11,7 | 2,45        | 11,29       | 0,312 | 260      | 5,84           |
| 16         | 1,38 | 1056     | 673   | 35         | 114,6      | 0,99  | 11,9 | 2,50        | 11,52       | 0,318 | 270      | 5,96           |
| 17         | 1,41 | 1076     | 686   | 35,7       | 116,8      | 1,02  | 12,1 | 2,55        | 11,76       | 0,324 | 281      | 6,07           |
| 18         | 1,43 | 1098     | 700   | 36,4       | 119,1      | 1,05  | 12,4 | 2,60        | 12,00       | 0,331 | 292      | 6,19           |
| 19         | 1,46 | 1119     | 713   | 37,1       | 121,4      | 1,08  | 12,6 | 2,65        | 12,24       | 0,337 | 304      | 6,31           |
| 20         | 1,49 | 1141     | 727   | 37,9       | 123,8      | 1,11  | 12,9 | 2,71        | 12,48       | 0,344 | 316      | 6,44           |

Окончание табл. 7.1

| № варианта | $D$  | $\gamma$ | $i_2$ | $\theta_1$ | $\theta_3$ | $C_3$ | $L$  | $\lambda_1$ | $\lambda_2$ | $R_d$ | $T_{об}$ | $\Delta\sigma$ |
|------------|------|----------|-------|------------|------------|-------|------|-------------|-------------|-------|----------|----------------|
| 21         | 1,52 | 1163     | 742   | 38,6       | 126,2      | 1,14  | 13,1 | 2,76        | 12,72       | 0,350 | 329      | 6,56           |
| 22         | 1,55 | 1186     | 756   | 39,4       | 128,7      | 1,17  | 13,4 | 2,82        | 12,97       | 0,357 | 342      | 6,69           |
| 23         | 1,58 | 1209     | 771   | 40,2       | 131,3      | 1,21  | 13,6 | 2,87        | 13,22       | 0,364 | 355      | 6,82           |
| 24         | 1,61 | 1233     | 786   | 41         | 133,8      | 1,24  | 13,9 | 2,93        | 13,48       | 0,371 | 370      | 6,96           |
| 25         | 1,64 | 1257     | 801   | 41,8       | 136,5      | 1,27  | 14,2 | 2,99        | 13,75       | 0,379 | 384      | 7,09           |

## Приложение А

Таблица 1

### Градуировочные таблицы основных промышленных термопар при температуре холодных спаев 0° С

| Температура T, С° | Градуировка   |                           |               |                           |               |                           |
|-------------------|---------------|---------------------------|---------------|---------------------------|---------------|---------------------------|
|                   | ТПП           |                           | ТХА           |                           | ТХК           |                           |
|                   | термо-ЭДС, мВ | к-поправочный коэффициент | термо-ЭДС, мВ | к-поправочный коэффициент | термо-ЭДС, мВ | к-поправочный коэффициент |
| 0                 | 0             |                           | 0             |                           | 0             |                           |
|                   |               | 1,0                       |               | 1,0                       |               | 1,0                       |
| 100               | 0,640         |                           | 4,10          |                           | 6,95          |                           |
|                   |               | 0,82                      |               | 1,0                       |               | 0,9                       |
| 200               | 1,421         |                           | 8,13          |                           | 14,66         |                           |
|                   |               | 0,72                      |               | 1,0                       |               | 0,83                      |
| 300               | 2,311         |                           | 12,21         |                           | 22,91         |                           |
|                   |               | 0,69                      |               | 0,98                      |               | 0,81                      |
| 400               | 3,244         |                           | 16,40         |                           | 31,49         |                           |
|                   |               | 0,66                      |               | 0,98                      |               | 0,83                      |
| 500               | 4,211         |                           | 20,65         |                           | 40,16         |                           |
|                   |               | 0,63                      |               | 1,0                       |               | 0,79                      |
| 600               | 5,214         |                           | 24,91         |                           | 49,02         |                           |
|                   |               | 0,62                      |               | 0,96                      |               | 0,78                      |
| 700               | 6,251         |                           | 29,15         |                           | 57,77         |                           |
|                   |               | 0,60                      |               | 1,0                       |               | 0,80                      |
| 800               | 7,323         |                           | 33,32         |                           | 66,42         |                           |
|                   |               | 0,59                      |               | 1,0                       |               | 0,80                      |
| 900               | 8,429         |                           | 37,37         |                           | –             |                           |
|                   |               | 0,56                      |               | 1,0                       |               | –                         |
| 1000              | 9,569         |                           | 41,32         |                           | –             |                           |
|                   |               | 0,55                      |               | 1,07                      |               | –                         |
| 1100              | 10,745        |                           | 45,16         |                           | –             |                           |
|                   |               | 0,53                      |               | 1,11                      |               | –                         |
| 1200              | 11,954        |                           | 48,87         |                           | –             |                           |
|                   |               | 0,51                      |               | 1,16                      |               | –                         |
| 1300              | 13,158        |                           | 52,43         |                           | –             |                           |

## Приложение Б

Таблица 1

### Градуировочные таблицы проволочных терморезисторов платиновых

| Температура T, С° | ТСП 50П | ТСП 100П |
|-------------------|---------|----------|
| 0                 | 50      | 100      |
| 50                | 59,855  | 119,71   |
| 100               | 69,745  | 139,1    |
| 150               | 79,11   | 158,22   |
| 200               | 88,515  | 177,03   |
| 250               | 97,775  | 195,55   |
| 300               | 106,89  | 213,78   |
| 350               | 115,855 | 231,71   |
| 400               | 124,68  | 249,36   |
| 450               | 133,355 | 267,71   |
| 500               | 141,88  | 283,76   |
| 550               | 150,255 | 300,51   |
| 600               | 158,48  | 333,10   |
| 700               | 174,465 | 348,93   |
| 750               | 182,235 | 364,47   |
| 800               | 189,86  | 379,72   |
| 850               | 197,335 | 394,67   |
| 900               | 204,665 | 409,33   |
| 950               | 211,85  | 423,70   |
| 1000              | 218,89  | 437,78   |

Таблица 2

## Градуировочные таблицы проволочных терморезисторов медных

| Температура T, С° | TСМ 10М | TСМ 50П | TСМ 100М |
|-------------------|---------|---------|----------|
| -50               | 7,848   | 39,24   | 78,48    |
| -40               | 8,281   | 41,405  | 82,81    |
| -30               | 8,712   | 43,56   | 87,12    |
| -20               | 9,142   | 45,71   | 91,42    |
| -10               | 9,572   | 47,86   | 95,72    |
| 0                 | 10,0    | 50      | 100      |
| 10                | 10,428  | 52,14   | 104,28   |
| 20                | 10,856  | 54,28   | 108,56   |
| 30                | 11,384  | 56,42   | 112,84   |
| 40                | 11,712  | 58,56   | 117,12   |
| 50                | 12,140  | 60,7    | 121,40   |
| 60                | 12,568  | 62,84   | 125,68   |
| 70                | 12,996  | 64,98   | 129,96   |
| 80                | 13,424  | 67,12   | 134,24   |
| 90                | 13,852  | 69,26   | 138,52   |
| 100               | 14,708  | 71,4    | 142,80   |
| 110               | 14,708  | 73,54   | 147,08   |
| 120               | 15,136  | 75,68   | 151,36   |
| 130               | 15,564  | 77,82   | 155,64   |
| 140               | 15,991  | 79,955  | 159,91   |
| 150               | 16,419  | 82,095  | 164,19   |
| 160               | 16,847  | 84,235  | 168,47   |
| 170               | 17,274  | 86,375  | 172,75   |
| 180               | 17,703  | 88,515  | 177,03   |
| 190               | 18,130  | 90,65   | 181,30   |
| 200               | 18,558  | 92,79   | 185,58   |

## Приложение В

Таблица 1

### Коэффициенты расхода для сужающих устройств

| $m^2_{\rho}$ | $m_{\rho}$ | Значение коэффициента для |        |           |        |
|--------------|------------|---------------------------|--------|-----------|--------|
|              |            | диафрагмы                 |        | для сопла |        |
|              |            | вода                      | воздух | вода      | воздух |
| 0,0025       | 0,050      | 0,600                     | 0,598  | 0,989     | 0,987  |
| 0,0050       | 0,070      | 0,603                     | 0,599  | 0,995     | 0,991  |
| 0,0100       | 0,100      | 0,607                     | 0,602  | 1,001     | 0,995  |
| 0,0300       | 0,173      | 0,620                     | 0,610  | 1,007     | 0,999  |
| 0,0500       | 0,224      | 0,632                     | 0,618  | 1,013     | 1,003  |
| 0,0700       | 0,264      | 0,643                     | 0,625  | 1,019     | 1,007  |
| 0,0900       | 0,300      | 0,654                     | 0,632  | 1,025     | 1,011  |
| 0,1100       | 0,332      | 0,664                     | 0,640  | 1,031     | 1,015  |
| 0,1300       | 0,360      | 0,674                     | 0,647  | 1,037     | 1,019  |
| 0,1500       | 0,387      | 0,685                     | 0,654  | 1,044     | 1,023  |
| 0,1700       | 0,412      | 0,695                     | 0,662  | 1,051     | 1,027  |
| 0,1900       | 0,436      | 0,705                     | 0,669  | 1,057     | 1,031  |
| 0,2100       | 0,458      | 0,716                     | 0,677  | 1,063     | 1,035  |
| 0,2300       | 0,479      | 0,726                     | 0,684  | 1,071     | 1,039  |
| 0,2500       | 0,500      | 0,737                     | 0,692  | 1,077     | 1,043  |
| 0,2700       | 0,520      | 0,747                     | 0,700  | 1,083     | 1,047  |
| 0,2900       | 0,538      | 0,758                     | 0,708  | 1,089     | 1,051  |
| 0,3100       | 0,557      | 0,769                     | 0,716  | 1,095     | 1,055  |
| 0,3300       | 0,574      | 0,781                     | 0,725  | 1,101     | 1,059  |
| 0,3500       | 0,592      | 0,793                     | 0,734  | 1,107     | 1,061  |
| 0,3600       | 0,600      | 0,798                     | 0,738  | 1,113     | 1,067  |

## Приложение Г

Таблица 1

### Психрометрическая таблица

| $T_{\text{сух}}$ | Разность показаний сухого и мокрого термометров, °С |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|------------------|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
|                  | 1   | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 |
| 0                | 81  | 64 | 50 | 36 | 26 | 16 | 7  | –  | –  | –  |
| 1                | 82  | 66 | 52 | 39 | 29 | 19 | 11 | –  | –  | –  |
| 2                | 83  | 67 | 64 | 42 | 31 | 23 | 14 | –  | –  | –  |
| 3                | 83  | 69 | 56 | 44 | 34 | 26 | 17 | 10 | –  | –  |
| 4                | 84  | 70 | 57 | 46 | 36 | 28 | 20 | 14 | –  | –  |
| 5                | 85  | 71 | 59 | 48 | 39 | 30 | 23 | 17 | 10 | –  |
| 6                | 85  | 72 | 61 | 50 | 41 | 33 | 26 | 19 | 13 | –  |
| 7                | 86  | 73 | 62 | 52 | 43 | 35 | 28 | 22 | 15 | 11 |
| 8                | 86  | 74 | 63 | 54 | 45 | 37 | 30 | 25 | 18 | 14 |
| 9                | 86  | 75 | 65 | 55 | 47 | 39 | 32 | 27 | 21 | 17 |
| 10               | 87  | 76 | 66 | 57 | 48 | 41 | 34 | 28 | 23 | 19 |
| 11               | 88  | 77 | 67 | 58 | 50 | 43 | 36 | 30 | 25 | 20 |
| 12               | 88  | 78 | 68 | 59 | 52 | 44 | 38 | 32 | 27 | 22 |
| 13               | 88  | 78 | 69 | 61 | 53 | 46 | 40 | 34 | 29 | 24 |
| 14               | 89  | 79 | 70 | 62 | 54 | 47 | 41 | 36 | 31 | 26 |
| 15               | 89  | 80 | 71 | 63 | 55 | 49 | 43 | 37 | 33 | 28 |
| 16               | 90  | 80 | 72 | 64 | 57 | 50 | 44 | 39 | 34 | 30 |
| 17               | 90  | 81 | 73 | 65 | 58 | 52 | 46 | 40 | 36 | 31 |
| 18               | 90  | 81 | 74 | 66 | 59 | 53 | 47 | 42 | 37 | 33 |
| 19               | 91  | 82 | 74 | 66 | 60 | 54 | 48 | 43 | 39 | 34 |
| 20               | 91  | 82 | 75 | 67 | 61 | 55 | 49 | 44 | 40 | 36 |
| 21               | 91  | 83 | 75 | 68 | 62 | 56 | 51 | 46 | 41 | 37 |
| 22               | 91  | 83 | 76 | 69 | 63 | 57 | 52 | 47 | 42 | 38 |
| 23               | 91  | 83 | 76 | 69 | 63 | 58 | 53 | 48 | 46 | 39 |
| 24               | 92  | 84 | 77 | 70 | 64 | 59 | 53 | 49 | 44 | 40 |
| 25               | 92  | 84 | 77 | 70 | 65 | 59 | 54 | 50 | 45 | 42 |
| 26               | 92  | 85 | 78 | 71 | 65 | 60 | 55 | 51 | 46 | 43 |
| 27               | 92  | 85 | 78 | 72 | 66 | 61 | 56 | 51 | 47 | 43 |
| 28               | 92  | 85 | 79 | 72 | 67 | 61 | 57 | 52 | 48 | 45 |
| 29               | 92  | 85 | 79 | 73 | 67 | 62 | 57 | 53 | 49 | 46 |
| 30               | 93  | 86 | 79 | 73 | 68 | 63 | 58 | 55 | 51 | 47 |
| 31               | 93  | 86 | 80 | 74 | 69 | 64 | 59 | 55 | 51 | 48 |
| 32               | 93  | 87 | 80 | 75 | 70 | 65 | 60 | 56 | 53 | 48 |
| 33               | 93  | 86 | 80 | 75 | 70 | 66 | 61 | 57 | 53 | 49 |
| 34               | 93  | 86 | 81 | 76 | 71 | 66 | 62 | 57 | 54 | 50 |
| 35               | 93  | 87 | 81 | 76 | 71 | 67 | 62 | 58 | 55 | 51 |
| 36               | 93  | 87 | 82 | 77 | 72 | 67 | 63 | 59 | 55 | 51 |

Окончание табл. 1

| $T_{\text{сух}}$ | Разность показаний сухого и мокрого термометров, °С |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|------------------|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
|                  | 1   | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 |
| 37               | 93  | 87 | 82 | 77 | 72 | 68 | 63 | 59 | 55 | 52 |
| 38               | 94  | 88 | 82 | 77 | 73 | 68 | 64 | 59 | 56 | 52 |
| 39               | 94  | 88 | 82 | 77 | 73 | 68 | 64 | 59 | 56 | 53 |
| 40               | 94  | 88 | 82 | 78 | 73 | 68 | 64 | 60 | 57 | 54 |
| 41               | 94  | 88 | 83 | 78 | 73 | 68 | 65 | 61 | 58 | 54 |
| 42               | 94  | 88 | 83 | 78 | 73 | 69 | 65 | 61 | 58 | 55 |
| 43               | 94  | 88 | 83 | 78 | 73 | 69 | 65 | 62 | 58 | 55 |
| 44               | 94  | 88 | 83 | 78 | 74 | 70 | 66 | 63 | 59 | 55 |
| 45               | 94  | 88 | 84 | 78 | 75 | 70 | 66 | 63 | 59 | 56 |

## Приложение Д

Таблица 1

### Максимальная масса водяного пара в воздухе

| Температура |    | Масса пара |                  | Температура |    | Масса пара |                  |
|-------------|----|------------|------------------|-------------|----|------------|------------------|
| -50         | °C | 0,038      | г/м <sup>3</sup> | 1           | °C | 5,209      | г/м <sup>3</sup> |
| -48         | °C | 0,048      | г/м <sup>3</sup> | 2           | °C | 5,57       | г/м <sup>3</sup> |
| -47         | °C | 0,054      | г/м <sup>3</sup> | 3           | °C | 5,953      | г/м <sup>3</sup> |
| -46         | °C | 0,06       | г/м <sup>3</sup> | 4           | °C | 6,395      | г/м <sup>3</sup> |
| -45         | °C | 0,067      | г/м <sup>3</sup> | 5           | °C | 6,79       | г/м <sup>3</sup> |
| -44         | °C | 0,075      | г/м <sup>3</sup> | 6           | °C | 7,246      | г/м <sup>3</sup> |
| -42         | °C | 0,093      | г/м <sup>3</sup> | 8           | °C | 8,234      | г/м <sup>3</sup> |
| -40         | °C | 0,117      | г/м <sup>3</sup> | 9           | °C | 8,784      | г/м <sup>3</sup> |
| -39         | °C | 0,13       | г/м <sup>3</sup> | 10          | °C | 9,356      | г/м <sup>3</sup> |
| -38         | °C | 0,144      | г/м <sup>3</sup> | 11          | °C | 9,961      | г/м <sup>3</sup> |
| -36         | °C | 0,178      | г/м <sup>3</sup> | 12          | °C | 10,6       | г/м <sup>3</sup> |
| -35         | °C | 0,198      | г/м <sup>3</sup> | 13          | °C | 11,276     | г/м <sup>3</sup> |
| -34         | °C | 0,22       | г/м <sup>3</sup> | 14          | °C | 11,987     | г/м <sup>3</sup> |
| -33         | °C | 0,244      | г/м <sup>3</sup> | 15          | °C | 12,739     | г/м <sup>3</sup> |
| -32         | °C | 0,271      | г/м <sup>3</sup> | 16          | °C | 13,531     | г/м <sup>3</sup> |
| -30         | °C | 0,33       | г/м <sup>3</sup> | 17          | °C | 14,367     | г/м <sup>3</sup> |
| -29         | °C | 0,37       | г/м <sup>3</sup> | 18          | °C | 15,246     | г/м <sup>3</sup> |
| -28         | °C | 0,41       | г/м <sup>3</sup> | 19          | °C | 16,172     | г/м <sup>3</sup> |
| -26         | °C | 0,51       | г/м <sup>3</sup> | 20          | °C | 17,148     | г/м <sup>3</sup> |
| -25         | °C | 0,55       | г/м <sup>3</sup> | 22          | °C | 19,252     | г/м <sup>3</sup> |
| -24         | °C | 0,6        | г/м <sup>3</sup> | 23          | °C | 20,386     | г/м <sup>3</sup> |
| -23         | °C | 0,66       | г/м <sup>3</sup> | 24          | °C | 21,578     | г/м <sup>3</sup> |
| -22         | °C | 0,73       | г/м <sup>3</sup> | 25          | °C | 22,83      | г/м <sup>3</sup> |
| -21         | °C | 0,8        | г/м <sup>3</sup> | 26          | °C | 24,143     | г/м <sup>3</sup> |
| -20         | °C | 0,88       | г/м <sup>3</sup> | 27          | °C | 25,524     | г/м <sup>3</sup> |
| -19         | °C | 0,96       | г/м <sup>3</sup> | 28          | °C | 26,97      | г/м <sup>3</sup> |
| -18         | °C | 1,05       | г/м <sup>3</sup> | 29          | °C | 28,488     | г/м <sup>3</sup> |
| -16         | °C | 1,27       | г/м <sup>3</sup> | 30          | °C | 30,078     | г/м <sup>3</sup> |
| -15         | °C | 1,38       | г/м <sup>3</sup> | 32          | °C | 33,49      | г/м <sup>3</sup> |
| -14         | °C | 1,51       | г/м <sup>3</sup> | 33          | °C | 35,317     | г/м <sup>3</sup> |
| -13         | °C | 1,65       | г/м <sup>3</sup> | 34          | °C | 37,229     | г/м <sup>3</sup> |
| -12         | °C | 1,8        | г/м <sup>3</sup> | 35          | °C | 39,286     | г/м <sup>3</sup> |
| -11         | °C | 1,96       | г/м <sup>3</sup> | 36          | °C | 41,322     | г/м <sup>3</sup> |
| -10         | °C | 2,156      | г/м <sup>3</sup> | 38          | °C | 45,593     | г/м <sup>3</sup> |

Окончание табл. 1

| Температура |    | Масса пара |                  | Температура |    | Масса пара |                  |
|-------------|----|------------|------------------|-------------|----|------------|------------------|
| -8          | °C | 2,537      | г/м <sup>3</sup> | 40          | °C | 50,672     | г/м <sup>3</sup> |
| -7          | °C | 2,751      | г/м <sup>3</sup> | 42          | °C | 55,989     | г/м <sup>3</sup> |
| -5          | °C | 3,238      | г/м <sup>3</sup> | 44          | °C | 61,772     | г/м <sup>3</sup> |
| -4          | °C | 3,513      | г/м <sup>3</sup> | 45          | °C | 64,848     | г/м <sup>3</sup> |
| -3          | °C | 3,889      | г/м <sup>3</sup> | 46          | °C | 68,056     | г/м <sup>3</sup> |
| -2          | °C | 4,135      | г/м <sup>3</sup> | 48          | °C | 74,871     | г/м <sup>3</sup> |
| -1          | °C | 4,487      | г/м <sup>3</sup> | 49          | °C | 78,497     | г/м <sup>3</sup> |
| 0           | °C | 4,868      | г/м <sup>3</sup> | 50          | °C | 82,257     | г/м <sup>3</sup> |

## Литература

### Основная

1. Исаакович, Р. Я. Контроль и автоматизация добычи нефти и газа / Р. Я. Исаакович, В. Е. Попадько. – М. : Недра, 1985.
2. Исаакович, Р. Я. Автоматизация производственных процессов в нефтяной и газовой промышленности / Р. Я. Исаакович, В. И. Логинов. – М. : Недра, 1985.
3. Проектирование систем автоматизации технологических процессов / А. С. Ключев [и др.]. – М. : Энергия, 1980.
4. Подкопаев, А. П. Технологические измерения и контрольно-измерительные приборы / А. П. Подкопаев. – М. : Недра, 1986.
5. Болтон, У. справочник инженера метролога / У. Болтон. – М. : Додэка-XXI, 2002.
6. Технические средства систем управления технологическими процессами в нефтяной и газовой промышленности / Е. Б. Андреев [и др.]. – М. : РГУ нефти и газа, 2004.

### Дополнительная

1. Плотников, В. М. Средства контроля и автоматизации объектов транспорта газа / В. М. Плотников. – М. : Недра, 1985.
2. Третьяков, Э. А. Автоматизированные системы управления производством / Э. А. Третьяков, Л. А. Игнатова. – М. : Машиностроение, 1997.
3. Справочник по автоматизации в газовой промышленности. – М. : Недра, 1990
4. Меньшов, Б. Г. Электрификация предприятий нефтяной и газовой промышленности / Б. Г. Меньшов, И. И. Суд. – М. : Недра, 1984.
5. Геворкян, В. Г. Основы сварочного дела / В. Г. Геворкян. – М. : Выс. шк., 1991.
6. Ялышко, Г. Ф. Сварка трубопроводов высокого давления / Г. Ф. Ялышко. – М. : Стройиздат, 1993.
7. Неразрушающий контроль и техническая диагностика : справочник / под ред. В. Ключева. – М. : Машиностроение, 2005.
8. Неразрушающие методы контроля Т. 1, 2, 3 / под ред. В. Я. Кершенбаума. – М. : Наука и техника, 1992.
9. Журналы «Контрольно-измерительные приборы и системы».
10. Журнал «Компьютер-пресс».

## Стандарты

ГОСТ 21.404–85. СПДС. Автоматизация технологических процессов. Обозначения условные.

ГОСТ 8.009–84. Нормированные метрологические характеристики средств измерений.

ГОСТ Р 9.585–2001. ГСИ. Термопары. Номинальные статические характеристики преобразователя.

ГОСТ 2405–88. Манометры, вакуумеры, моновакуумеры, напорометры, тягомеры и тягонапорометры.

## Содержание

|  |    |
|--|----|
| Введение .....   | 3  |
| Лабораторная работа 1 «Определение температуры газа в пласте и температурного градиента» ..... | 5  |
| Лабораторная работа 2 «Измерение давления в пласте» .....                                      | 14 |
| Лабораторная работа 3 «Измерение расхода жидкости и газа» .....                                | 21 |
| Лабораторная работа 4 «Измерение уровня жидкости.....»   | 26 |
| Лабораторная работа 5 «Измерение влажности воздуха и газа».....                                | 33 |
| Лабораторная работа 6 «Расчет органа регулирования расхода воды» .....                         | 39 |
| Лабораторная работа 7 «Выбор регулятора температуры на основании расчетов» .....               | 47 |
| Приложение А .....   | 58 |
| Приложение Б .....   | 59 |
| Приложение В .....   | 61 |
| Приложение Г .....   | 62 |
| Приложение Д .....   | 64 |
| Литература .....   | 66 |

**Атвиновская Татьяна Владимировна**

# **АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ**

**Практикум  
по одноименной дисциплине для студентов  
специальности 1-51 02 02 «Разработка  
и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений»  
дневной и заочной форм обучения**

Подписано к размещению в электронную библиотеку  
ГГТУ им. П. О. Сухого в качестве электронного  
учебно-методического документа 28.12.20.

Пер. № 102Е.  
<http://www.gstu.by>