

Е. Ф. ШКАТОВ
В. В. ШУВАЛОВ

ОСНОВЫ
АВТОМАТИЗАЦИИ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
ПРОЦЕССОВ
ХИМИЧЕСКИХ
ПРОИЗВОДСТВ

*Допущено Министерством
химической промышленности
в качестве учебника для учащихся
средних специальных
учебных заведений химического профиля*



Москва
«Химия»
1988

ББК 6П7.1

Ш663

УДК 66.012-52(075.32)

Рецензенты: В. В. Сорокин (Волгоградский химико-технологический техникум), А. В. Пархоменко (Днепродзержинский заочный химико-технологический техникум).

Шкатов Е. Ф., Шувалов В. В.

Ш663 Основы автоматизации технологических процессов химических производств. Учебник для техникумов. — М.: Химия, 1988. 304 с.: ил.

ISBN 5—7245—0026—4

В книге рассмотрены основы методов контроля и регулирования различных технологических параметров химических производств; изложены принципы действия и конструкции контрольно-измерительных приборов и регуляторов, широко применяемых в системах автоматизации производств химической промышленности; даны основы вычислительной техники, используемой в автоматизированных системах управления технологическими процессами.

Книга предназначена в качестве учебника для учащихся средних специальных учебных заведений по специальностям 0805, 0810, 0811, 0813, 0817, 0831, 0832, 0833, 0835, 05108 и 0546; может быть полезна инженерно-техническим работникам химической, нефтехимической и промышленности минеральных удобрений.

Ш 2801000000—185 Св. пл. для сред. спец.
050(01)—88 учеб. заведений — 42—88

ББК 6П7.1

Учебник для техникумов

ШКАТОВ ЕВГЕНИЙ ФИЛИППОВИЧ
ШУВАЛОВ ВАЛЕРИЙ ВАСИЛЬЕВИЧ

**Основы автоматизации
технологических
процессов
химических
производств**

Редакторы *Г. И. Тюшевская, Л. В. Швыркова*
Художественный редактор *Л. А. Леонтьева*
Технический редактор *Б. М. Молодцов*
Корректор *Т. С. Васина*

ИБ № 2198

Сдано в наб. 28.10.87. Подп. в печ. 30.12.87. Формат бумаги 60×88¹/₁₆. Бумага тип. № 2. Гарн. литературная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 19.0. Усл. кр.-отт. 19.0. Уч.-изд. 20.63. Тираж 19 500 экз. Заказ 1379. Цена 95 коп.

Ордена «Знак Почета» издательство «Химия». 107076, Москва, Стромынка, 21, корп. 2. Московская типография № 11 Союзполиграфпрома при Государственном комитете по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 113105, Москва, Нагатинская ул., д. 1.

ISBN 5—7245—0026—4

© Издательство «Химия», 1988 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	6
РАЗДЕЛ I. АВТОМАТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ	7
<hr/>	
Глава 1. Системы автоматического контроля и основы метрологии	7
1.1. Системы автоматического контроля	7
1.2. Основы метрологии	9
Глава 2. Измерительные преобразователи и средства измерений	14
2.1. Классификация измерительных преобразователей	14
2.2. Электрические измерительные преобразователи	15
2.3. Пневматические измерительные преобразователи	17
2.4. Электропневматические и пневмоэлектрические измерительные преобразователи	21
2.5. Средства измерений	23
Глава 3. Контроль давления	26
3.1. Общие сведения	26
3.2. Жидкостные манометры	27
3.3. Деформационные приборы	29
3.4. Грузопоршневой манометр	32
3.5. Электрические манометры	33
3.6. Пневматические манометры	36
3.7. Выбор, установка и защита от коррозии средств измерения давления	39
Глава 4. Контроль количества и расхода материалов	41
4.1. Основные понятия. Единицы измерения	41
4.2. Измерение количества жидкости и газа	42
4.3. Измерение количества твердых веществ	47
4.4. Измерение расхода методом переменного перепада давлений	50
4.5. Расходомеры постоянного перепада давлений	61
4.6. Разные расходомеры	64
Глава 5. Контроль уровня жидкостей и сыпучих материалов	69
5.1. Измерение уровня жидкостей	69
5.2. Измерение уровня сыпучих тел	77
Глава 6. Контроль температуры	79
6.1. Классификация приборов контроля температуры	79
6.2. Термометры расширения и манометрические термометры	81
6.3. Электрические термометры сопротивления	88
6.4. Термоэлектрические термометры	95
6.5. Общие условия измерения температур контактными преобразователями	106
6.6. Пирометры излучения	108
Глава 7. Контроль качества и состава материалов	113
7.1. Основные понятия	113
7.2. Измерение концентрации растворов	114
7.3. Измерение концентрации водородных ионов в растворах (рН-метрия)	123

7.4. Измерение плотности жидкостей	124
7.5. Измерение влажности газов и твердых материалов	130
7.6. Измерение вязкости жидкостей	134
7.7. Газовый анализ	137

РАЗДЕЛ II. АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ 149

Глава 8. Системы автоматического регулирования и их характеристики	149
8.1. Основные понятия и определения	149
8.2. Классификация систем автоматического регулирования	152
8.3. Элементарные типовые звенья САР	158
Глава 9. Объекты регулирования и их основные свойства	162
9.1. Классификация объектов регулирования	162
9.2. Свойства объектов регулирования	165
9.3. Возмущающие воздействия в объектах регулирования	169
Глава 10. Автоматические регуляторы и их характеристики	173
10.1. Классификация автоматических регуляторов	173
10.2. Позиционные регуляторы	175
10.3. Интегральные регуляторы (И-регуляторы)	176
10.4. Пропорциональные регуляторы (П-регуляторы)	178
10.5. Пропорционально-интегральные регуляторы (ПИ-регуляторы)	180
10.6. Регуляторы с предварением	184
Глава 11. Конструкции и характеристики серийных средств автоматизации	186
11.1. Регуляторы прямого действия	186
11.2. Пневматические регуляторы	187
11.3. Исполнительные устройства пневматических регуляторов	197
11.4. Вспомогательное оборудование пневматических приборов	209
11.5. Электрические регуляторы	213
11.6. Гидравлические регуляторы	219
11.7. Схемы регулирования с использованием пневматических устройств и выбор регуляторов	222
Глава 12. Принципы составления схем автоматизации	226
12.1. Стадии разработки конструкторской документации	226
12.2. Графическое оформление схем автоматизации	228
12.3. Щиты и пульты	232
12.4. Функциональные схемы автоматизации	237
12.5. Сигнализация и блокировка	242
12.6. Состав текстовых документов	247

РАЗДЕЛ III. УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ 252

Глава 13. Основные понятия управления технологическими процессами	252
13.1. Общие сведения об управлении технологическими процессами	252
13.2. Объект управления	252
13.3. Система управления	253
Глава 14. Управление гидромеханическими процессами	254
14.1. Перемещение жидкостей и газов	254
14.2. Смешение жидкостей	256

14.3. Отстаивание жидких систем	257
14.4. Центрифугирование жидких систем	259
14.5. Фильтрация жидких систем	260
14.6. Фильтрация газовых систем	260
Глава 15. Управление тепловыми процессами	262
15.1. Нагревание жидкостей	262
15.2. Выпаривание	265
15.3. Кристаллизация	267
Глава 16. Управление массообменными процессами	268
16.1. Ректификация	268
16.2. Абсорбция	272
16.3. Адсорбция	275
16.4. Сушка	275
Глава 17. Управление механическими процессами	280
17.1. Перемещение твердых материалов	280
17.2. Дозирование твердых материалов	281
17.3. Измельчение твердых материалов	283
РАЗДЕЛ IV. АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ	284
<hr/>	
Глава 18. Общие вопросы внедрения АСУ	284
18.1. Необходимость внедрения новых методов и средств управления	284
18.2. Основные принципы построения АСУ	285
18.3. Виды АСУ	286
18.4. Экономическая эффективность АСУ	286
Глава 19. Автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУТП)	288
19.1. Назначение и принцип действия АСУТП	288
19.2. Основные функции АСУТП	289
19.3. Режимы работы АСУТП	293
19.4. Работа технологического персонала с периферийными устройствами ЭВМ	294
19.5. Виды обеспечений АСУТП	294
19.6. Комплекс технических средств АСУТП	295
19.7. Агрегатные комплексы технических средств АСУТП	296
19.8. Распределенные системы управления технологическими процессами	296
<i>Библиографический список</i>	<i>298</i>
<i>Предметный указатель</i>	<i>299</i>

ПРЕДИСЛОВИЕ

В принятых на XXVII съезде КПСС «Основных направлениях экономического и социального развития страны на 1986—1990 годы и на период до 2000 года» исключительно большая роль отведена дальнейшему развитию автоматизации технологических процессов и производств в целом.

Под автоматизацией понимают применение методов и средств автоматики для управления производственными процессами. Понятие «управление производственным процессом» подразумевает целенаправленное воздействие на этот процесс, которое обеспечивает оптимальный или заданный режим его работы. Процесс управления складывается из многих элементарных операций, которые по их назначению можно объединить в три группы:

1) получение и обработка информации о фактическом состоянии управляемого технологического процесса;

2) анализ полученной информации и принятие необходимого решения о воздействии на процесс;

3) осуществление принятого решения, т. е. воздействие на технологический процесс изменением материальных или энергетических потоков.

Автоматизация производства — это этап машинного производства, характеризуемый освобождением человека от непосредственного выполнения функций управления производственными процессами и передачей этих функций автоматическим устройствам.

Конечной целью автоматизации является создание полностью автоматизированных производств, где роль человека сведется к составлению режимов и программ технологических процессов, к контролю за работой приборов, ЭВМ и их наладке.

Кроме технической стороны, автоматизация имеет также и большое социальное значение. Если в странах капитала автоматизация служит средством порабощения рабочего человека и направлена на увеличение максимальной прибыли монополий, то в условиях социалистического общества автоматизация облегчает труд человека и обеспечивает повышение материального благосостояния всех трудящихся.

Для широкого внедрения автоматики в производство необходимо, чтобы каждый технический работник, независимо от его специальности, был знаком с основами автоматизации технологических процессов.

АВТОМАТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ

ГЛАВА I

СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ И ОСНОВЫ МЕТРОЛОГИИ

1.1. СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ

Системой автоматического контроля называют систему, состоящую из объекта контроля и различных устройств, выполняющих функции измерения. Под объектом контроля понимают агрегат или процесс, в котором одну или несколько величин измеряют.

В большинстве случаев система автоматического контроля одной величины включает четыре элемента: объект, чувствительный элемент, линию связи и измерительное устройство. Чувствительный элемент устанавливается непосредственно в объекте контроля, он воспринимает величину контролируемого (измеряемого) параметра и преобразует ее в соответствующий сигнал, поступающий по линии связи к измерительному устройству. Структурная схема такой системы показана на рис. 1.1, где каждый из элементов представлен прямоугольником; стрелки между прямоугольниками показывают направление передачи сигналов с одного элемента на другой. Элементы характеризуются сигналами на входе и выходе, называемыми также входными и выходными сигналами. Здесь передача сигнала идет в одном направлении, т. е. от объекта к измерительному устройству. Такие системы автоматического контроля называют разомкнутыми. В некоторых системах контроля чувствительный элемент является элементом измерительного устройства. В этом случае линия связи между чувствительным и измерительным элементами отсутствует, а структурные схемы системы контроля соответствуют схемам, приведенным на рис. 1.2.

Если измерительный прибор, например термометр или манометр (прибор для измерения давления) устанавливают непосредственно на объекте, то системе контроля соответствует схема на рис. 1.2, а. Если же измерительный прибор, например манометр, установлен на небольшом расстоянии от объекта и соединен с объектом линий связи (трубкой), то системе контроля соответствует схема на рис. 1.2, б.

Системы автоматического контроля подразделяются на местные, дистанционные и телен измерительные.

Системы контроля, в которых измерительные устройства расположены вблизи объекта (вблизи места установки чувствительного элемента), называются *местными*.

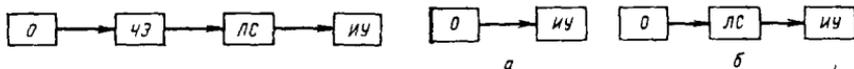


Рис. 1.1. Структурная схема системы автоматического контроля:

О — объект; ЧЭ — чувствительный элемент; ЛС — линия связи; ИУ — измерительное устройство

Рис. 1.2. Структурные схемы систем автоматического контроля без чувствительных элементов (обозначения те же, что и на рис. 1.1):

а — прибор установлен на объекте; б — прибор установлен вне объекта

Автоматический контроль можно осуществлять и на расстоянии от контролируемого объекта, удлинив линию связи между чувствительным элементом и измерительным устройством. В этих случаях система местного контроля усложняется введением в измерительное устройство преобразователя для преобразования результата измерения в пропорциональный пневматический или электрический сигнал. Последний содержит информацию о величине измеряемого параметра и по соответствующей линии связи передает ее другому измерительному устройству, расположенному на расстоянии от объекта контроля. Во втором измерительном приборе осуществляется обратное преобразование сигнала, переданного по линии связи, в результат измерения. Подобная система автоматического контроля называется *дистанционной*. Таким образом, дистанционная система контроля имеет два измерительных устройства: первичный и вторичный приборы.

В зависимости от вида используемой энергии дистанционные системы подразделяются на пневматические, электрические и гидравлические.

В *пневматических системах* используется энергия сжатого воздуха. К первичному прибору подводится воздух под постоянным избыточным давлением 0,14 МПа (1,4 кгс/см²), а на его выходе давление изменяется в зависимости от величины измеряемого параметра в пределах от 0,02 до 0,1 МПа (от 0,2 до 1,0 кгс/см²).

В *электрических системах* используется электроэнергия. В первичном приборе результат измерения преобразуется в силу или напряжение постоянного электрического тока или напряжение переменного электрического тока, величины которых пропорциональны результату измерения. В электрических системах дистанционной передачи используются также частотные преобразователи, которые преобразуют результат измерения в пропорциональную величину частоты переменного тока.

В химической, нефтехимической и промышленности по производству минеральных удобрений в основном применяют пневматические дистанционные системы автоматического контроля. Электрические системы используют значительно реже, а гидравлические — не применяют вообще.

Для передачи результатов измерения на расстояние десятков и сотен километров применяют *телеизмерительные системы* контроля. В таких системах результат измерения при помощи преобразователя в первичном приборе преобразуется в кодированные, обычно дискретные сигналы, передаваемые по каналу (линии) связи. Во вторичном приборе, установленном на другом конце канала связи, эти сигналы преобразуются в результат измерения и фиксируются в цифровой или аналоговой форме.

Для контроля за работой сложных производственных процессов находят применение системы *централизованного контроля*. В этом случае вторичные приборы устанавливают на центральном щите. В крупных цехах с большим числом точек контроля центральный щит может достигать десятков метров в длину и становится недоступным для обозрения оператора. Для наилучшей организации централизованного контроля применяют специальные машины — машины централизованного контроля (МЦК), которые собирают и автоматически обрабатывают информацию при контроле сложных производственных процессов.

Выходная информация, которая используется для воздействия на контролируемый процесс, называется *оперативной*. Чтобы сократить выходную информацию о большинстве контролируемых величин, ее можно заменить сигнализацией, которая включается только тогда, когда какая-либо контролируемая величина достигает некоторого наперед заданного значения. Обычно при отклонении контролируемого параметра от заданного значения машина выдает световой (зажигание или мигание лампочки) или звуковой (звонок, гонг) сигнал. Значения контролируемых величин могут быть также получены оператором по вызову. Отклонения контролируемых параметров от установленных пределов измерения по вызову регистрируются в непрерывной или цифровой форме.

Для контроля за работой сложных производственных процессов промышленность выпускает управляющие пневматические установки «Номинал», «Ритм», «Рацион», «Бином» и агрегатную пневматическую систему «Курс-2».

1.2. ОСНОВЫ МЕТРОЛОГИИ

Методы измерения. Под методом измерения понимают совокупность приемов использования принципов и средств измерений. Для прямых измерений можно выделить несколько основных методов: непосредственной оценки, сравнения с мерой, дифференциальный, нулевой, совпадения.

Метод непосредственной оценки дает значение измеряемой величины по отсчетному устройству измерительного прибора прямого действия. Например, измерение давления пружинным манометром. Точность измерений этим методом бывает огра-

нической, но быстрота процесса измерения делает его незаменимым для практического применения. Наиболее многочисленной группой средств измерений этим методом являются показывающие, в том числе и стрелочные приборы (манометры, вольтметры, расходомеры).

В случае выполнения особо точных измерений применяют *метод сравнения с мерой*: измеряемую величину сравнивают с величиной, воспроизводимой мерой. Например, измерение массы на рычажных весах с уравниванием гири.

По *дифференциальному (разностному) методу* измеряют разность между значениями измеряемой и известной (воспроизводимой мерой) величин. Например, сравнение измерений с образцовой мерой на компараторе при поверке мер длины. Дифференциальный (разностный) метод позволяет получать результаты с высокой точностью даже при применении относительно грубых средств измерения разности. Но осуществлять этот метод можно только при условии воспроизведения с большой точностью известной величины, значение которой близко к значению измеряемой. Это во многих случаях легче, чем изготовить средство измерений высокой точности.

Качество измерений. По ГОСТ 16263—70 качество измерений характеризуется точностью, достоверностью, правильностью, сходимостью и воспроизводимостью измерений, а также размером допускаемых погрешностей.

Точность — это качество измерений, отражающее близость их результатов к истинному значению измеряемой величины. Высокая точность измерений соответствует малым погрешностям всех видов.

Достоверность измерений характеризует степень доверия к результатам измерений.

Под *правильностью измерений* понимают качество измерений, отражающее близость к нулю систематических погрешностей в результатах измерений.

Сходимость — это качество измерений, отражающее близость результатов измерений, выполняемых в одинаковых условиях.

Воспроизводимость — это такое качество измерений, которое отражает близость друг к другу результатов измерений, выполняемых в различных условиях (в различное время, в различных местах, разными методами и средствами).

Погрешность измерения есть отклонение результатов измерения от истинного значения измеряемой величины. По форме числового выражения погрешности измерений подразделяются на абсолютные и относительные. Абсолютной называется погрешность измерения, выраженная в единицах измеряемой величины. Она определяется выражением

$$\Delta = X - X_0, \quad (1.1)$$

где X — результат измерений; X_0 — истинное значение измеряемой величины.

Поскольку истинное значение измеряемой величины остается неизвестным, на практике пользуются лишь приближенной оценкой абсолютной погрешности измерения, определяемой выражением

$$\Delta = X - X_d, \quad (1.2)$$

где X_d — действительное значение измеряемой величины, которое с погрешностью ее определения принимают за истинное значение.

Относительной погрешностью измерения δ называют отношение абсолютной погрешности измерения к действительному значению измеряемой величины

$$\delta = \Delta / X_d. \quad (1.3)$$

Систематической погрешностью называется составляющая погрешности измерения, остающаяся постоянной или закономерно изменяемая при повторных измерениях одной и той же величины.

Случайной погрешностью называется составляющая погрешности измерения, изменяющаяся случайным образом при повторных измерениях одной и той же величины. Случайные погрешности можно обнаружить только при многократных измерениях. Они являются результатом случайных изменений многочисленных условий измерений, учет которых практически неосуществим.

Иногда в результатах наблюдений может появиться погрешность, существенно превышающая ожидаемую при данных условиях, — это так называемая *грубая погрешность*. Результаты наблюдений, содержащие грубые погрешности, при обработке исключают, используя различные критерии, в соответствии с ГОСТ 11.002—72.

Для оценки метрологических характеристик средств измерений в отечественном приборостроении используют классы точности. ГОСТ 8.401—80 регламентирует способы назначения классов точности в зависимости от способа выражения пределов допускаемых погрешностей средств измерений. Этим стандартом предусмотрено выражение предельно допускаемых погрешностей средств измерений в виде абсолютных, относительных и приведенных погрешностей.

Абсолютная погрешность должна быть выражена как

$$\Delta = \pm a, \quad (1.4)$$

где Δ — предел допускаемой абсолютной погрешности, выраженной в единицах величины на входе (выходе), либо условно в делениях шкалы; a — именованное положительное число, выраженное в тех же единицах.

Относительная погрешность выражается формулой

$$\delta = \Delta \cdot 100 / X = \pm C, \quad (1.5)$$

где δ — предел допускаемой относительной погрешности, %; X — интервал измерений прибора.

Приведенную погрешность определяют по формуле

$$\gamma = \Delta \cdot 100 / X_N, \quad (1.6)$$

где γ — предел допускаемой приведенной погрешности, %; X_N — нормирующее значение, которое при установлении приведенной погрешности принимают равным: конечному значению шкалы прибора, если нулевая отметка находится на краю или вне шкалы; сумме конечных значений шкалы прибора (без учета знаков), если нулевая отметка находится внутри шкалы; номинальному значению измеряемой величины, если таковое установлено; длине шкалы, если шкала неравномерная (логарифмическая или гиперболическая). В этом случае погрешность и длина шкалы выражаются в одних и тех же единицах.

Средствам измерений, пределы допускаемых погрешностей которых выражаются в единицах измеряемой величины или в делениях шкалы (абсолютная погрешность), должны быть присвоены классы точности, обозначаемые порядковыми номерами, причем средствам измерений с большим значением допускаемых погрешностей должны соответствовать большие порядковые номера.

Средствам измерений, пределы допускаемых погрешностей которых выражены как относительные или приведенные погрешности, должны быть присвоены классы точности, выбираемые из ряда чисел: (1; 1,5; 2; 2,5; 3; 4; 5; 6) 10^n , где $n = 0, 1, \dots, -1$.

Класс точности устанавливают при выпуске прибора, градуируя его по образцовому прибору в нормальных условиях. Показание образцового прибора принимают за истинное значение измеряемой величины.

Чтобы уменьшить относительную погрешность, нужно выбирать верхний предел шкалы измерительного прибора таким, чтобы ожидаемое значение измеряемой величины (показание) находилось в последней трети (или половине) ее.

Абсолютной погрешностью меры Δ называют разность между номинальным ее значением и истинным (действительным) значением воспроизводимой ею величины

$$\Delta = X_n - X_d, \quad (1.7)$$

где X_n — номинальное значение меры; X_d — действительное значение меры.

Пример. Погрешность гири 4-го класса с номинальным значением 2 кг и истинным значением 2,00010 кг равна $-0,10$ г (-100 мг), а отклонение от номинального значения для этой меры равно 0,10 г (100 мг).

Абсолютная погрешность измерительного прибора ΔX_n — это разность между показанием прибора и истинным (действительным) значением измеряемой величины

$$\Delta X_n = X_n - X_d, \quad (1.8)$$

где X_n — показания прибора; X_d — действительное значение измеряемой величины.

За действительное значение измеряемой величины принимают показания образцового прибора, если его погрешность в четыре — пять раз меньше погрешности поверяемого.

Если же погрешность образцового прибора только в 2—3 раза меньше погрешности поверяемого, то за действительное значение измеряемой величины принимают показания образцового прибора плюс поправка по свидетельству на данное значение.

Относительная погрешность меры или измерительного прибора δ_n — это отношение абсолютной погрешности меры или измерительного прибора к истинному (действительному) значению воспроизводимой или измеряемой величины. Относительная погрешность меры или измерительного прибора может быть выражена как (в %)

$$\delta_n = \pm (\Delta X_n / X_n) \cdot 100. \quad (1.9)$$

Приведенная погрешность γ измерительного прибора — это отношение погрешности измерительного прибора к нормирующему значению. Нормирующее значение X_N — это условно принятое значение, равное или верхнему пределу измерений, или находится в интервале измерений или в интервале длины шкалы. Приведенную погрешность обычно выражают как (в %)

$$\gamma = \Delta X_n / X_N. \quad (1.10)$$

Пример. Определить абсолютную, относительную и приведенную погрешности потенциометра с верхним пределом измерений 150°C при показании его $X_n = 120^\circ\text{C}$ и действительном значении измеряемой температуры $X_d = 120,6^\circ\text{C}$. За нормирующее значение принят верхний предел измерения $X_N = 150^\circ\text{C}$.

Абсолютная погрешность по формуле (1.8) $\Delta X_n = -0,6^\circ\text{C}$; относительная погрешность по формуле (1.9) $\delta_n = \pm 0,5\%$; приведенная погрешность по формуле (1.10) $\gamma = \pm 0,4\%$.

Основная погрешность средства измерений — это погрешность средства измерений, используемого в нормальных условиях, которые обычно определены в нормативно-технических документах на данное средство измерений.

Под *дополнительными погрешностями* понимают изменение погрешности средств измерений вследствие отклонения влияющих величин от нормальных значений или выхода за пределы нормальной области значений.

Погрешности средств измерений, являющиеся определенными неслучайными функциями каких-либо факторов, относят к *систематическим погрешностям*. Они остаются постоянными или закономерно изменяются. Например, причиной систематической погрешности измерительного прибора может служить неточное нанесение отметок шкалы.

Случайная погрешность средства измерений — составляющая погрешности, изменяющаяся случайным образом.

При определении модели основной погрешности следует учитывать и погрешности, вызываемые такими явлениями, как трение, люфт, гистерезис и т. п. Погрешность, порождаемую этими явлениями, называют погрешностью средства измерения вследствие *вариации*.

Вариация показаний измерительного прибора — разность между значениями показаний измерительного прибора, соответствующими данной точке интервала измерения при двух направлениях подхода к данной точке.

ГЛАВА 2

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ

2.1. КЛАССИФИКАЦИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Устройства этой группы Государственной системы приборов (ГСП) должны реагировать на изменения контролируемого параметра и выдавать на выходе унифицированный сигнал. Преобразователи, входящие в эту группу в соответствии с ГОСТ 16263—85, можно подразделить на первичные измерительные преобразователи, масштабные измерительные преобразователи, нормирующие и передающие измерительные преобразователи (два последних здесь не рассматриваются).

Первичный измерительный преобразователь переводит контролируемый параметр в выходную физическую величину (перемещение, усилие, сопротивление, напряжение, силу тока, частоту). Выходная физическая величина, полученная из контролируемой простым — «естественным» — преобразованием, называется естественной выходной величиной (или естественным выходным сигналом).

Нормирующий преобразователь переводит естественный выходной сигнал в унифицированный. Если на выходе первичного измерительного преобразователя, чувствительный элемент которого непосредственно воспринимает изменения контролируемого параметра, выдается пневматический или электрический сигнал, то нормирующий преобразователь обычно представляет собой отдельное самостоятельное устройство. Если же первичный преобразователь выдает сигнал в виде усилия, перемещения или какой-нибудь другой физической величины, по своей природе отличающейся от электрической или пневматической, то измерительный и нормирующий преобразователи объединяют конструктивно в один прибор. Оба решения находят широкое применение в практике создания преобразователей для систем автоматизации. В системе ГСП разработан унифицированный ряд взаимозаменяемых пневматических и электрических первичных преобразователей блочного типа с силовой компенсацией. Используя этот ряд преобразователей, можно значительное количество различных измеряемых параметров сравнительно просто и с достаточной точностью преобразовать в одну естественную выходную величину — усилие.

Пневматические первичные измерительные преобразователи имеют выходной сигнал 0,02—0,1 МПа (0,2—1,0 кгс/см²), электрические 0—20 мА и 0—5 мА постоянного тока. Компенсационный принцип действия этих преобразователей обеспечивает их высокие метрологические характеристики и простоту перенастройки в большом интервале пределов измерений. Каждый первичный преобразователь состоит из унифицированного электрического или пневматического преобразователя усилия и измерительного блока.

Класс точности унифицированных преобразователей в основном 0,6; 1,0 и лишь для некоторых 1,6 и 2,5.

2.2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Из электрических аналоговых преобразователей, выполняемых по схеме *компенсации перемещений* для преобразования неэлектрических величин в электрический выходной сигнал и передачи показаний на расстояние, наибольшее применение нашли дифференциально-трансформаторные, ферродинамические, магнитомодуляционные и сельсинные преобразователи.

В дифференциально трансформаторных преобразователях перемещение сердечника первичного прибора уравнивается известным перемещением сердечника вторичного прибора. Дифференциально-трансформаторные преобразователи используются при измерении давления, уровня, расхода и некоторых других параметров.

Схема дифференциально-трансформаторного преобразователя (рис. 2.1) состоит из двух одинаковых катушек, одна из которых находится в первичном приборе 1, а другая — во вторичном приборе 2. Первичные обмотки катушек включены последовательно и питаются напряжением переменного тока от об-

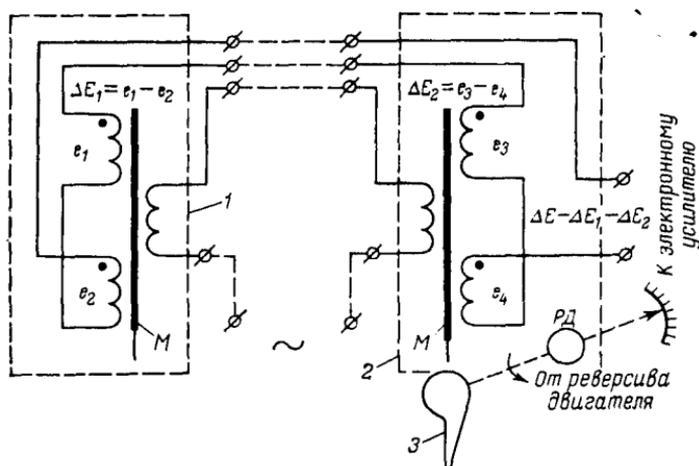


Рис. 2.1. Схема дифференциально-трансформаторного преобразователя

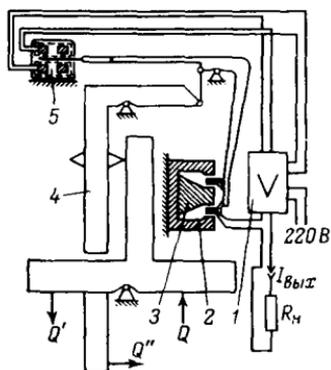


Рис. 2.2. Принципиальная схема электросилового линейного преобразователя

мотки силового трансформатора электронного усилителя. Вторичные обмотки включены навстречу одна другой с выходом на электронный усилитель. Внутри катушек находятся железные плунжеры (магнитопроводы) M . Если плунжеры обеих катушек находятся в среднем положении, то величины э. д. с., наводимые в катушках, равны между собой. При рас-

согласовании положений плунжеров величины э. д. с., наводимые в катушках, неравны между собой.

Разность этих э. д. с. усиливается в электронном усилителе до величины, необходимой для управления реверсивным двигателем $РД$. Последний через профилированный диск $З$ перемещает плунжер в катушке вторичного прибора в положение, согласованное с положением плунжера в катушке первичного прибора, что приводит к равенству э. д. с., наводимых в обеих катушках, а следовательно, к новому состоянию равновесия. При этом результирующая э. д. с. вторичных обмоток будет снова равна нулю, и реверсивный двигатель остановится. Одновременно реверсивный двигатель связан со стрелкой и пером вторичного прибора.

При перемещении плунжера первичного прибора на расстояние до 5 мм зависимость индуктированной э. д. с. практически линейна. Вторичные приборы дифференциально-трансформаторной системы построены на базе автоматических потенциометров.

В электрических преобразователях аналоговой ветви ГСП используют электросиловые преобразователи двух типов — линейный, обеспечивающий прямо пропорциональную (линейную) зависимость между усилием и выходным сигналом, и квадратичный, выходной сигнал которого пропорционален корню квадратному из усилия. Преобразователи комплектуют усилителем типа УП-20, выполненным в виде отдельного блока.

Принципиальная схема линейного преобразователя представлена на рис. 2.2. Усилие Q , которым измерительный блок воздействует на преобразователь, вызывает незначительное перемещение рычажной системы 4 передаточного механизма и связанного с ней управляющего флажка 5 индикатора рассогласования. Индикатор рассогласования дифференциально-трансформаторного типа преобразует это перемещение в управляющий сигнал переменного тока, поступающий на вход электронного усилителя 1 . Выходной сигнал усилителя в виде постоянного тока поступает в катушку 2 силового устройства и одно-

временно в последовательно соединенную с ней линию дистанционной передачи.

В линейном преобразователе при взаимодействии постоянного магнита 3 с магнитным полем, создаваемым током, протекающим в катушке 2, создается пропорциональное силе тока усилие, уравновешивающее через рычажную систему входное усилие.

В квадратичном преобразователе сила, с которой втягивается ферромагнитный проводник в поле, создаваемое неподвижным электромагнитом, пропорциональна квадрату силы тока, протекающего по катушке.

Линейный и квадратичный преобразователи различаются только устройством обратной связи силового механизма.

Конструкция преобразователя позволяет присоединять к нему измерительные блоки, создающие усилия в разных направлениях Q' , Q'' или Q . Дистанционная передача сигнала может достигать 10 км.

Подключаемые к преобразователю вторичные приборы можно разделить на две группы: работающие от унифицированного сигнала постоянного тока (миллиамперметры, приборы магнитоэлектрической и электромагнитной систем) и работающие от сигнала постоянного напряжения (вольтметры, промышленные потенциометры, электрические машины централизованного контроля и управления).

Приборы первой группы (токовые) подключают к электронному усилителю преобразователя в разрыв электрической цепи двухпроводной линии связи (приборы этой группы соединены последовательно). Приборы второй группы (приборы постоянного напряжения) подключают параллельно нагрузочному сопротивлению R_n , включенному в цепь двухпроводной линии связи.

2.3. ПНЕВМАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

В пневматических преобразователях основным элементом является система сопло-заслонка (рис. 2.3). В трубку 1 небольшого диаметра непрерывно поступает воздух под давлением P_0 . Пройдя через дроссель постоянного сечения 2, воздух выходит в атмосферу через дроссель 3 (сопло), перед которым находится заслонка 4. Если изменить зазор Δx между соплом и заслонкой, то давление воздуха P в междроссельном пространстве

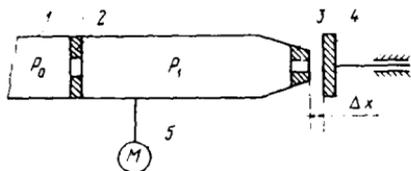


Рис. 2.3. Пневмопреобразователь типа сопло-заслонка

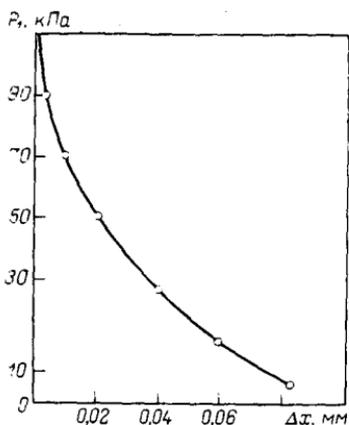


Рис. 2.4. Зависимость давления P_1 в междроссельном пространстве системы сопло-заслонка от зазора Δx между соплом и заслонкой

будет также изменяться: увеличиваться с приближением заслонки к соплу и уменьшаться при удалении заслонки от сопла. Изменение давления P_1 контролируется манометром 5.

Зависимость между зазором Δx и давлением P_1 показана на рис. 2.4. Как видно из графика, весьма

небольшие перемещения заслонки (до 0.08 мм) вызывают значительные — от 10 до 110 кПа — изменения давления воздуха P_1 .

Преобразователи силовой компенсации. Для непрерывного преобразования абсолютного, избыточного и вакуумметрического давления (разрежения, перепада давления), расхода, температуры жидкостей и газов, уровня, плотности жидкости и некоторых других параметров в пневматический сигнал дистанционной передачи предназначены преобразователи, основанные на принципе силовой компенсации. В этих преобразователях измеряемый параметр воздействует на чувствительный элемент измерительного блока и преобразуется в усилие, которое автоматически уравнивается усилием, развиваемым давлением воздуха в сильфоне обратной связи. Это давление является одновременно выходным сигналом преобразователя.

Принципиальная схема преобразователя представлена на рис. 2.5. Усилие Q , которым измерительный блок воздействует на преобразователь, вызывает незначительное перемещение рыча-

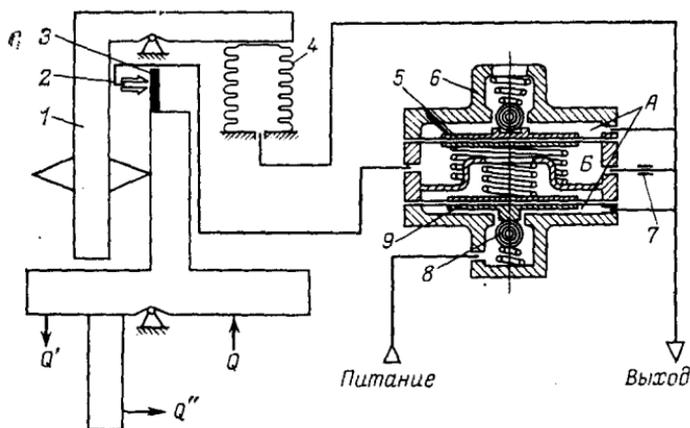


Рис. 2.5. Принципиальная схема пневматического силового преобразователя

чажной системы 1 передаточного механизма и связанной с ней заслонки 3 относительно неподвижного сопла 2. Возникший в линии сопла сигнал управляет давлением, поступающим с пневмоусилителя в сильфон 4 обратной связи.

Конструкция преобразователя позволяет присоединять к нему измерительные блоки, создающие усилие в разных направлениях Q , Q' или Q'' . Усилитель (пневмореле) состоит из трех секций, разделенных мембранами из прорезиненного полотна, которые образуют две камеры давления командного воздуха А и камеру линии сопла Б. Повышение давления в линии сопла вызывает перемещение мембран 5 и 9, и клапан 8 открывается. При этом давление командного воздуха повышается на величину, равную величине повышения давления в линии сопла, возникает постоянный перепад на дросселе 7, и влияние изменения давления питания значительно уменьшается. При уменьшении давления в линии сопла шариковый клапан 8 закрывается, клапан сброса 6 открывается, и давление командного воздуха уменьшается. Преобразователь обеспечивает дистанционную передачу выходного сигнала по пневмотрассе длиной до 300 м. Класс точности преобразователя 1,0.

Преобразователь типа III предназначен для преобразования угловых перемещений в пропорциональный пневматический сигнал. Используется в качестве выходного преобразователя в приборах и устройствах частотно-ферродинамической системы, устанавливаемых в схемах автоматического управления производственными процессами. Принципиальная схема преобразователя приведена на рис. 2.6.

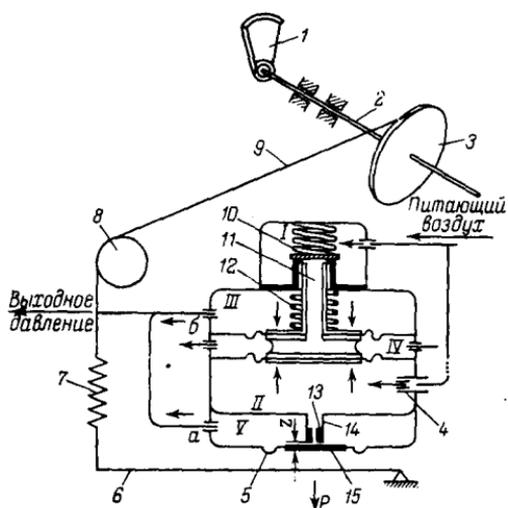
Угловое перемещение сектора 1 через ось 2 передается барабану 3. При помощи гибкой ленты 9, связанной с барабаном и огибающей отклоняющий ролик 8, угол поворота барабана преобразуется в пропорциональное усилие пружины 7. Усилие, развиваемое пружиной, через рычаг 6 воздействует на заслонку 15 пневмоусилителя.

Основным элементом пневмоусилителя является «сопло-заслонка». Питающий воздух из линии поступает в камеру I и через постоянный дроссель 4 в камеру II. Давление в камере II зависит от количества воздуха, поступающего в эту камеру через дроссель 4, и расхода его через сопло 14.

Если усилие P , действующее на заслонку 15 со стороны рычага 6, равно нулю, то дросселирование в сопло 14 весьма незначительно, и давление в камере II приближается к атмосферному. При этом усилие, действующее на мембранную систему 13 снизу вверх, меньше, чем усилие пружины 12, и полный шток 11 попадает в камеру IV, соединенную с атмосферой.

При увеличении усилия P , изменяющегося пропорционально углу поворота входной оси 2, сопло 14 в большей степени прикрывается заслонкой 15. Зазор z уменьшается, что создает дополнительное сопротивление истечению воздуха через сопло. Поэтому давление в камере II превышает давление в камере III,

Рис. 2.6. Принципиальная схема преобразователя ПП



и мембранная система 13 перемещается вверх. Полюй шток 11 упирается в тарельчатый клапан 10, закрывая выход в атмосферу, и приподнимает его, открывая доступ питающему воздуху из камеры I в камеру III. Давление в камере III, являющееся одновременно выходным, увеличивается до величины, при которой усилие, действующее на мембранную систему 13 снизу вверх и сверху вниз, уравниваются.

Одновременно выходное давление из камеры III передается в камеру V. Это давление, воздействуя на мембрану 5, с которой связана заслонка 15, — уравнивает усилие P.

Линейность характеристики достигается тем, что мембранная система 13 поджата пружинной 12 всегда на одну и ту же величину, а так как перемещение тарельчатого клапана 10 очень мало, перепад давления на сопле 14 постояен.

Класс точности преобразователя 1,0. Преобразователь обеспечивает передачу по пневмотрассе показаний на расстоянии до 300 м.

В качестве вторичных приборов в пневматических системах можно применять любые измерители давления, а также вторичные приборы, например системы «Старт». На рис. 2.7 показана кинематическая схема вторичного прибора системы «Старт» (ПВ2.2).

Действие приборов основано на компенсационном принципе измерения. Приборы используются для работы с пневматическими преобразователями или другими устройствами, выдающими унифицированные аналоговые сигналы 20—100 кПа (0,2—1,0 кгс/см²).

В измерительном узле входной пневматический сигнал P преобразуется в поступательное перемещение указателя (стрелки) и пера. Контролируемый параметр (входной пневматический сигнал P) поступает в приемный сильфон 2. Воздух питания под давлением $P_{пит}$ через дроссель 1 подается в силовой элемент 7 и к соплу 3. При изменении входного давления сильфон 2, дно которого упирается в рычаг 4, перемещает его, изменяя зазор между соплом и рычагом.

При перемещении рычага 4 вправо давление в силовом элементе 7 увеличивается, так как зазор между рычагом и соплом

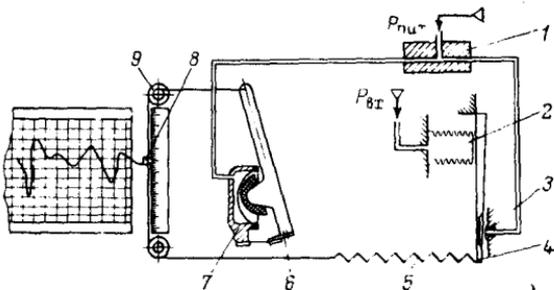


Рис. 2.7. Кинематическая схема вторичного прибора системы «Старт»

уменьшается. Это давление передается на рычаг 6 силового элемента, и ролик 9 поворачивается на угол, необходимый для достижения равновесия на рычаге 4 между усилиями от давления в сильфоне и пружины обратной связи 5. Углу поворота ролика соответствует пропорциональное перемещение стрелки (пера) 8. Шкала прибора стопроцентная линейная. Класс точности 1,0.

2.4. ЭЛЕКТРОПНЕВМАТИЧЕСКИЕ И ПНЕВМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Для согласования электрической и пневматической ветвей ГСП выпускаются электропневматические и пневмоэлектрические преобразователи. Рассмотрим некоторые из них.

Преобразователь электропневматический (типа ЭП) предназначен для преобразования непрерывного унифицированного электрического сигнала постоянного тока в непрерывный унифицированный пневматический сигнал. Работа преобразователя основана на принципе силовой компенсации.

Прибор состоит из двух функционально различных блоков: электромеханического преобразователя (совокупность магнитоэлектрического механизма и рычажной системы) и пневматического усилителя. Входной электрический сигнал подводится к катушкам электромагнита 7 (рис. 2.8). При этом в магнитопроводе возникает магнитный поток, вызывающий перемещение якоря 6. Усилие на якоре прямо пропорционально силе тока. Перемещение рычага 4 под действием этой силы вызывает изменение давления в линии сопла 3, установленного на основании 2. Это давление усиливает

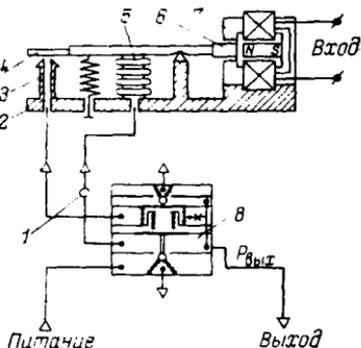


Рис. 2.8. Принципиальная схема электропневматического преобразователя

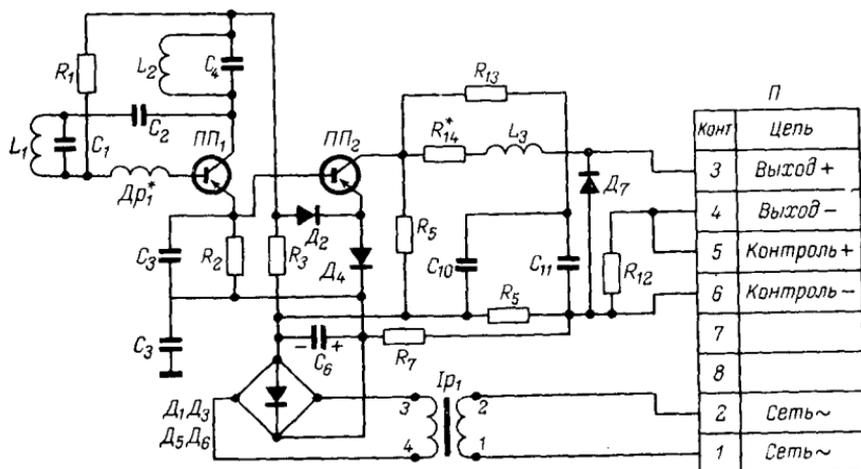


Рис. 2.9. Принципиальная схема пневмоэлектрического преобразователя

ется пневматическим усилителем (реле) 8 и по пневмолиниям передается на выход преобразователя и в сильфон обратной связи 5. Усиление, возникающее в сильфоне под воздействием выходного давления, уравнивается через рычаг усилие на якоре от входного сигнала. Для сглаживания колебаний в линии сопла имеется пневмемкость 1. Класс точности 0,5; 1,0.

Преобразователь пневмоэлектрический (типа ПЭ-55М) предназначен для преобразования пневматического сигнала, поступающего от пневматического датчика или пневматического регулятора, в унифицированный электрический сигнал постоянного тока (рис. 2.9). Прибор состоит из магнитоэлектрического гальванометра, блока питания и манометрической трубки, установленных в общем корпусе.

Входной сигнал в виде давления, подлежащего измерению и преобразованию, попадая во внутреннюю полость манометрической трубки, деформирует ее. Конец трубки через спиральную пружину передает перемещение подвижной системы гальванометра (флажка), находящегося в высокочастотном поле катушки, входящей в базовый контур генератора. При перемещении флажка изменяются параметры базового контура, что приводит к изменению режима генератора. При этом изменяется постоянная составляющая коллекторного тока, что приводит к изменению силы тока базы транзистора ПП, и, следовательно, к изменению силы выходного тока. В цепь коллектора ПП включена катушка обратной связи, укрепленная на коромысле в поле постоянного магнита. Выходной ток, обтекая катушку, создает момент обратной связи, противоположный моменту, создаваемому при растяжении пружины. Флажок перемещается и сила выходного тока изменяется до тех пор, пока эти моменты станут равными. Класс точности преобразователя 1,0.

2.5. СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ

Виды средств измерений. Средства измерений представляют собой совокупность технических средств, используемых при различных измерениях и имеющих нормированные метрологические характеристики. К средствам измерений относят меры и измерительные приборы, измерительные преобразователи, а также измерительные установки, измерительные системы.

Меры представляют собой средства измерений, служащие для воспроизведения физической величины заданного размера. Мерами являются, например, гири, катушки сопротивления. К мерам относятся также стандартные образцы и образцовые вещества.

Стандартный образец — мера для воспроизведения единицы величины, характеризующей свойства или состав веществ и материалов. Например, стандартный образец ферромагнитных материалов с аттестованным содержанием химических элементов.

Образцовое вещество — мера, представляющая собой вещество с известными свойствами, воспроизводимыми при соблюдении условий приготовления, указанных в утвержденной спецификации. Например, «чистые» газы, «чистые» металлы, «чистая» вода. При помощи стандартных образцов и образцовых веществ осуществляют наладку и контроль технологических процессов.

Измерительный прибор — это средство измерений, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, доступной для восприятия наблюдателем.

Измерительная установка — средства измерений, представляющие собой совокупность функционально объединенных измерительных приборов измерительных преобразователей и других вспомогательных устройств, расположенных в одном месте и связанных единством конструктивного исполнения.

Примером измерительной установки может служить pH-метр, состоящий из первичного преобразователя (комплекта электродов) вторичного прибора (потенциометра) и вспомогательного устройства (высокоомного усилителя).

Кроме рассмотренных средств измерений существуют *измерительные системы*, представляющие собой совокупность средств измерений и вспомогательных устройств, соединенных между собой каналами связи, и предназначенные для получения измерительной информации в форме, удобной для автоматической обработки, передачи и использования в автоматизированных системах управления.

Вторичное измерительное устройство (вторичный прибор) — средство измерений, предназначенное для работы в комплекте с измерительными приборами, а также с некоторыми видами первичных и промежуточных преобразователей.

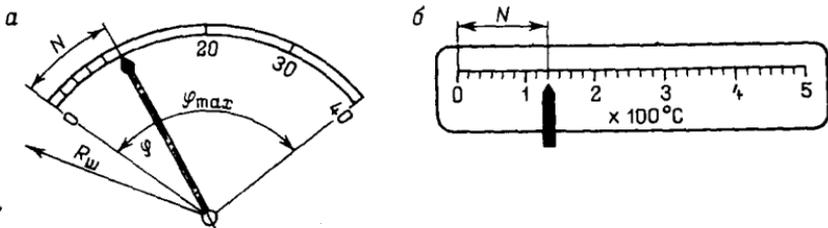


Рис. 2.10. Шкальные отсчетные устройства:
а — с дугообразной шкалой; *б* — с горизонтальной шкалой

Измерительные приборы очень разнообразны и различаются принципом действия, конструкцией и др. Общим для всех измерительных приборов является наличие отсчетных устройств. По способу отсчета значений измеряемых величин приборы подразделяются на показывающие, т. е. допускающие только отсчитывание показаний, и регистрирующие, в которых предусмотрена регистрация показаний. К показывающим относят аналоговые и цифровые приборы.

Отсчетные устройства аналоговых приборов состоят из шкалы и указателя — стрелки; показания прибора являются непрерывной функцией измеряемой величины.

Цифровой измерительный прибор автоматически вырабатывает дискретные сигналы измерительной информации, показания прибора представлены в цифровой форме.

Приборы, в которых предусмотрена регистрация показаний в форме диаграммы, называют с а м о п и ш у щ и м и.

При шкальном отсчете шкалы могут быть неподвижными и подвижными (шкала перемещается относительно неподвижного указателя). Отметки на шкалах располагаются вдоль прямой линии или по дуге окружности на плоской или цилиндрической поверхности (рис. 2.10). На рис. 2.11 показаны наиболее типичные шкалы измерительных приборов.

Шкалы, нулевая отметка которых совпадает с началом или концом шкалы, называются *о д н о с т о р о н н и м и*. Шкала называется *д в у с т о р о н н е й*, если нулевая отметка не совпадает с началом или концом шкалы (например, термометр расширения с пределом показаний от -50 до $+50$ °С).

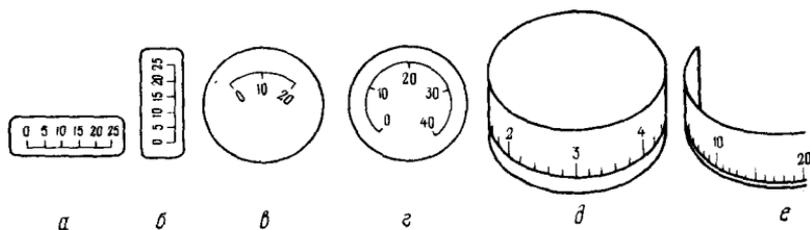


Рис. 2.11. Шкалы:

а — горизонтальная; *б* — вертикальная; *в* — дугообразная (с углом дуги до 180°); *г* — дисковая круговая (с углом дуги более 180°); *д* — вращающаяся цилиндрическая; *е* — профильная

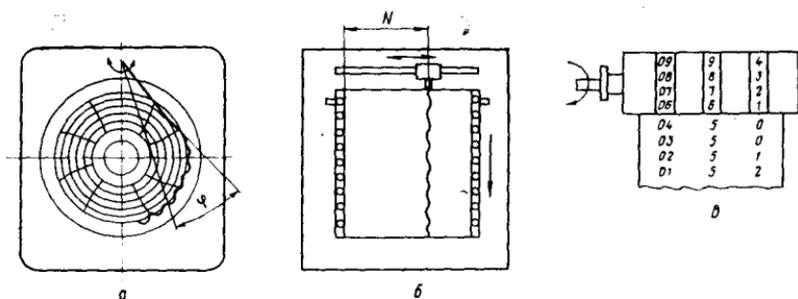


Рис. 2.12. Регистрирующие устройства:
 а — с записью в полярных координатах; б — с записью в прямоугольных координатах;
 в — с печатающим устройством

Делением шкалы называется промежуток между осями или центрами двух смежных отметок. Длины делений равномерных шкал — одинаковые; неравномерных шкал — неодинаковые.

Самопишущие (регистрирующие) приборы имеют приспособления для автоматической записи на бумажной ленте или диске текущего значения измеряемой величины во времени (рис. 2.12).

Ленточные диаграммы бывают двух типов: с прямолинейным движением пера прибора и с движением пера по дуге окружности. Дисковые диаграммы могут быть с равномерными и неравномерными делениями.

Государственная система приборов. Построение Государственной системы приборов (ГСП) основано на применении определенных системно-технических принципов, позволяющих наиболее рационально решить проблему обеспечения техническими средствами разнообразных систем контроля регулирования и управления технологическими процессами.

ГСП представляет собой совокупность нормализованных рядов унифицированных блоков, приборов и узлов, составленных из минимального числа блоков-модулей, на основе которых собирается любое устройство, входящее в ГСП. ГСП предусматривает преобразование измеряемых параметров (температуры, давления и т. п.) в единую форму информации, удобную для передачи на расстояние.

Устройства ГСП по роду используемой вспомогательной энергии носителя сигналов в канале связи, применяемой для приема и передачи информации и команд управления, делятся на электрические, пневматические и гидравлические. В ГСП входят также устройства, работающие без использования вспомогательной энергии (приборы и регуляторы прямого действия).

Устройства, питающиеся при эксплуатации энергией одного рода, образуют единую структурную группу в Государственной системе приборов или ветвь ГСП. По функциональному признаку изделия ГСП разделяются на следующие группы уст-

ройств, предназначенные для: получения информации о состоянии процесса; приема, преобразования и передачи информации по каналам связи; преобразования, хранения и обработки информации и формирования команд управления; использования командной информации для воздействия на процесс и связи с оператором.

Для обеспечения информационного сопряжения между блоками, приборами и установками ГСП применяют унифицированные сигналы (УС). Унифицированный сигнал (УС) ГСП — сигнал дистанционной передачи информации с унифицированными параметрами.

В зависимости от вида унифицированных параметров в ГСП применяют УС четырех групп: 1) сигналы тока и напряжения электрические непрерывные; 2) сигналы частотные электрические непрерывные; 3) сигналы электрические кодированные; 4) пневматические сигналы.

ГЛАВА 3

КОНТРОЛЬ ДАВЛЕНИЯ

3.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Давление — один из важнейших параметров технологических процессов. За единицу измерения давления в Международной системе единиц (СИ) принят паскаль (Па). Однако до настоящего времени используют также внесистемные единицы: кг/см², мм вод. ст. и бар. Эти единицы связаны следующими соотношениями: 1 кгс/см² = 98 066,5 Па; 1 мм вод. ст. = 9,80665 Па, 1 мм рт. ст. = 133,322 Па, 1 бар = 10⁵ Па.

При измерении давления необходимо различать абсолютное, избыточное и атмосферное давление, а также вакуум.

Абсолютное давление P_a — параметр состояния вещества (жидкостей, газов и паров). Избыточное давление P_n — разность между абсолютным давлением P_a и атмосферным давлением P_b (т. е. давлением окружающей среды)

$$P_n = P_a - P_b. \quad (3.1)$$

Если абсолютное давление ниже атмосферного, то

$$P_n = P_b - P_a. \quad (3.2)$$

где P_n — давление (разрежение), измеряемое вакуумом.

По ГОСТ 2405—80 (СТ СЭВ 1641—79) приборы для измерения давления классифицируются по принципу действия и по роду измеряемой величины.

По принципу действия приборы для измерения давления подразделяются на следующие:

жидкостные, основанные на уравнивании измеряемого давления давлением соответствующего столба жидкости; деформационные, измеряющие давление по величине деформации различных упругих элементов или по развиваемой силе; грузопоршневые, в которых измеряемое давление уравнивается внешней силой, действующей на поршень; электрические, основанные или на преобразовании давления в одну из электрических величин, или на изменении электрических свойств материала под действием давления.

По роду измеряемой величины приборы для измерения давления делятся на:

манометры — приборы для измерения абсолютного и избыточного давления;

вакуумметры — приборы для измерения вакуума;

мановакуумметры — приборы для измерения избыточного давления и вакуума;

дифференциальные манометры — приборы для измерения разности двух давлений, ни одно из которых не является давлением окружающей среды;

барометры — приборы для измерения атмосферного воздуха;

напоромеры (микроманометры) — приборы для измерения малых избыточных давлений;

тягомеры (микроманометры) — приборы для измерения малых разрежений;

тягонапоромеры (микроманометры) — приборы для измерения малых давлений и разрежений.

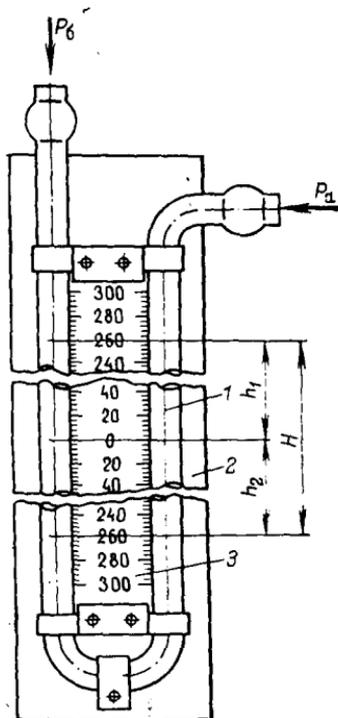
3.2. ЖИДКОСТНЫЕ МАНОМЕТРЫ

Жидкостные манометры отличаются простотой конструкций и сравнительно высокой точностью измерения. Их широко применяют как в качестве переносных (лабораторных), так и технических приборов для измерения давления.

Переносный U-образный манометр, представляющий собой согнутую в виде буквы U стеклянную трубку 1, показан на рис. 3.1. Трубка закреплена на доске 2 со шкалой 3, расположенной между коленами трубки, и заполнена жидкостью (спиртом, водой, ртутью). Один конец трубки соединен с полостью, в которой измеряется давление, другой конец трубки сообщается с атмосферой. Под действием измеряемого давления жидкость в трубке перемещается из одного колена в другое до тех пор, пока измеряемое давление не уравновесится гидростатическим давлением столба жидкости в открытом колене. Если давление в полости, с которой соединен прибор, ниже атмосферного, то жидкость в коленах переместится в обратном направлении, и высота ее столба будет соответствовать вакууму.

Присоединив оба колена трубки к полостям с различными давлениями P_1 и P_2 , можно определить разность давлений.

Рис. 3.1. U-образный манометр



Манометр заполняют жидкостью до нулевой отметки шкалы. Для определения высоты столба жидкости необходимо сделать два отсчета (снижение в одном колене и подъем в другом) и суммировать их величины, т. е. $H = h_1 + h_2$.

Чашечный манометр, являющийся разновидностью U-образного, показан на рис. 3.2. Одно из колен чашечного манометра выполнено в виде сосуда (чашки) 1, диаметр которого больше диаметра трубки 2, представляющей собой другое колено. Полость с измеряемым давлением (больше атмосферного) соединяется с чашечкой, а трубка соединяется с атмосферой. Так как площадь сечения чашки больше площади сечения трубки, жидкость под действием давления в чашке опускается на высоту, которая меньше высоты подъема в трубке. Обычно

площадь сечения чашки значительно больше сечения трубки, поэтому величиной понижения уровня жидкости в чашке пренебрегают, и результат отсчитывают только по высоте столба жидкости в трубке от начального значения. Однако при этом возникает погрешность, вызванная понижением уровня жидкости в чашке, что изменяет положение нуля шкалы. Например, при диаметре чашки D , в десять раз большем диаметра трубки d , получим

$$h_2 = 0,01h_1, \quad (3.3)$$

т. е. относительная погрешность составит 1%. Таким образом, погрешность прибора зависит от отношения площадей сечений трубки и чашки и может быть сколько угодно малой. На практике площади сечений чашки s и трубки S выбирают обычно такими, чтобы отношением s/S можно было пренебречь. В основном для чашечных приборов $s/S \leq 1/400$.

Микроманометр с наклонной трубкой. При измерении малых давлений и разрежений порядка миллиметров или десятков миллиметров столба жидкости ошибка отсчета становится весьма значительной. Например, при высоте столба жидкости, равного 10 мм, ошибка отсчета 0,5 мм дает погрешность измерения, равную 5% измеряемой величины. Поэтому при измерении малых давлений приходится применять приборы, обеспечивающие большую точность измерения, чем U-образные или чашечные манометры.

Рис. 3.2. Чашечный (однотрубный) манометр

Одним из наиболее распространенных приборов этого типа является манометр с наклонной трубкой (рис. 3.3). Прибор состоит из стеклянного сосуда 2, к которому припаяна стеклянная трубка 3, наклоненная под некоторым углом α к горизонту. Сосуд с трубкой укреплены на деревянной доске 1 со шкалой, градуированной в мм водяного столба. Для удобства шкала сделана подвижной, чтобы при заполнении прибора жидкостью можно было совместить нуль шкалы с мениском жидкости в трубке. При измерении давления ниже атмосферного (разрежения) к пространству присоединяют конец трубки 3. Для точной установки в горизонтальной плоскости прибор снабжен уровнем 4. Поскольку трубка 3 наклонена, высота столба жидкости, уравнивающая измеряемое давление, будет равна:

$$h = n \sin \alpha, \quad (3.4)$$

где n — перемещение мениска жидкости в трубке, отсчитанное по шкале.

Таким образом, цена деления шкалы в $1/\sin \alpha$ раз больше высоты столба жидкости. Изменение уровня жидкости в сосуде 2 при подъеме жидкости в трубке учитывается при градуировке шкалы и поэтому не вносит ошибки в измерение. Микроманометры с наклонной трубкой изготавливают обычно для измерения давления в интервале 1,57—980 Па.

3.3. ДЕФОРМАЦИОННЫЕ ПРИБОРЫ

В промышленной практике измерения давления и разности давлений широкое применение получили деформационные (с упругим чувствительным элементом) приборы. В этих приборах давление определяется по деформации упругих чувствительных элементов или по развиваемой ими силе, которые преобразуются передаточными механизмами в угловое или линейное переме-

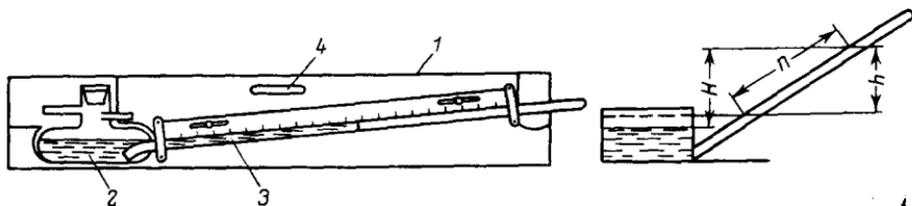


Рис. 3.3. Микроманометр с наклонной трубкой

шение указателя по шкале прибора. В качестве упругих элементов используют трубчатые пружины, мембраны, мембранные коробки и сильфоны.

По виду упругого чувствительного элемента пружинные приборы делятся на следующие группы:

- 1) приборы с трубчатой пружиной (рис. 3.4, а и б);
- 2) мембранные приборы, упругим элементом которых служит мембрана (рис. 3.4, в), мембранная коробка (рис. 3.4, г и д), блок мембранных коробок (рис. 3.4, е и ж);
- 3) пружинно-мембранные с гибкой мембраной (рис. 3.4, з);
- 4) приборы с упругой гармониковой мембраной (сильфоном) (рис. 3.4, к);
- 5) пружинно-сильфонные (рис. 3.4, и).

Приборы с чувствительным элементом в виде гофрированных мембран, мембранных коробок и мембранных блоков применяют для измерения небольших избыточных давлений и разрежений (манометры, напоромеры и тягомеры), а также перепадов давления (дифференциальные манометры). Зависимость прогиба мембраны от измеряемого давления в общем случае нелинейна. Число, форма и размеры гофра зависят от назначения прибора, пределов измерения и других факторов.

Чтобы увеличить прогиб в приборах для малых давлений, мембраны попарно соединяют в мембранные коробки, а коробки в мембранные блоки. Мембранные коробки могут быть анероидными (рис. 3.4, г) и манометрическими (рис. 3.4, д). Анероидные коробки, применяемые в барометрах, герметизированы и заполнены воздухом или инертным газом при давлении 1 Па. Деформация анероидной коробки происходит под воздействием разности давления окружающей ее среды и давления в полости коробки. Так как давление в полости коробки очень мало, мож-

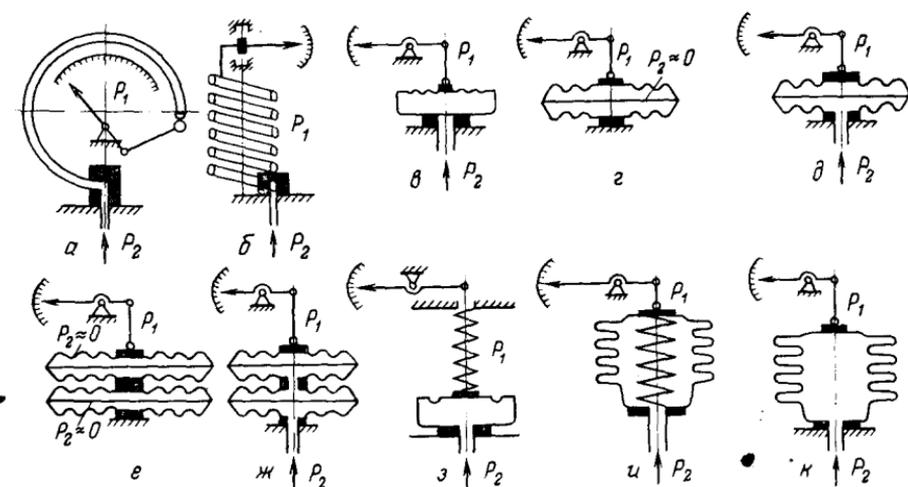


Рис. 3.4. Типы пружинных манометров

Рис. 3.5. Принципиальная схема манометра с трубчатой пружиной

но считать, что ее деформация определяется атмосферным давлением. Деформация анероидной или манометрической коробки равна сумме деформаций составляющих ее мембран.

Третий вид упругих элементов манометров составляют особые гофрированные коробки, называемые сильфонами. Сильфон представляет собой цилиндрический тонкостенный сосуд, на боковой поверхности которого выдавлены

глубокие параллельные волны (рис. 3.4, к). При воздействии осевой нагрузки, внешнего или внутреннего давления длина сильфона изменяется, увеличиваясь или уменьшаясь в зависимости от направления приложенной силы.

Манометры с трубчатой пружиной — один из наиболее распространенных видов деформационных приборов (рис. 3.5).

Чувствительным элементом таких приборов является согнутая по дуге круга и запаянная с одного конца трубка 7 эллиптического или овального сечения. Открытым концом трубки 7 через держатель 2 и ниппель 1 присоединяют к источнику измеряемого давления. Свободный (запаянный) конец 8 трубки 7 через передаточный механизм соединен с осью 4 стрелки 10, перемещающейся по шкале манометра.

Трубки манометров, рассчитанных на давление до 500 кПа (50 кгс/см²), изготавливают из меди, а трубки манометров, рассчитанных на большее давление, — из стали.

Свойство изогнутой трубки некруглого сечения — изменять величину изгиба при изменении давления — обусловлено изменением формы сечения. Под действием давления внутри трубки эллиптическое или овальное сечение, деформируясь, приближается к круговому, что приводит к раскручиванию трубки, т. е. к угловому перемещению ее свободного конца. Это перемещение в определенных пределах пропорционально измеряемому давлению. Поэтому максимальное рабочее давление манометра должно быть ниже предела пропорциональности с некоторым запасом прочности.

В соответствии с этим шкалу манометра (верхний предел измерения) выбирают таким образом, чтобы рабочий предел измерения (наибольшее рабочее давление) был не менее $\frac{3}{4}$ верхнего предела измерения при постоянном давлении и не менее $\frac{2}{3}$ верхнего предела измерения при переменном давлении.

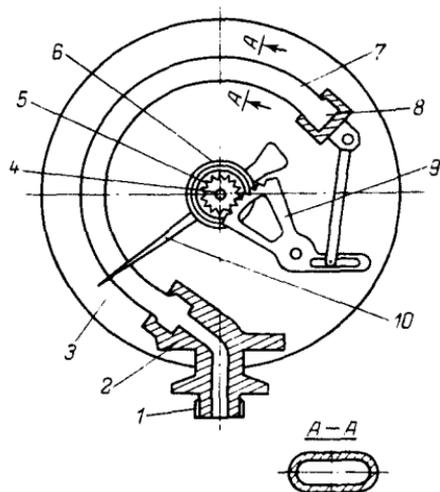
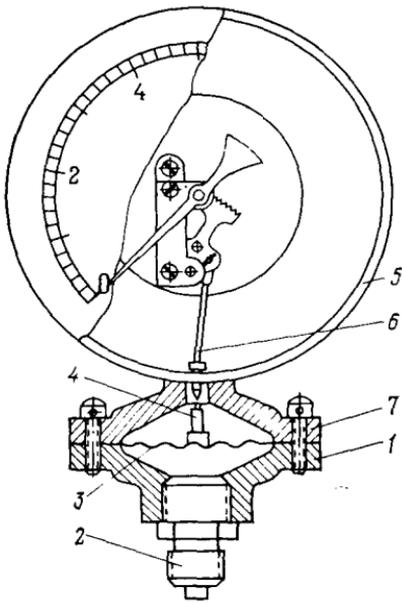


Рис. 3.6. Мембранный манометр



Верхние пределы измерения манометра выбирают из ряда: 1; 1,6; 2,5; 4 и $6 \cdot 10^n$, где n — любое целое положительное или отрицательное число.

Перемещение свободного конца трубки под действием давления весьма невелико, поэтому в конструкцию прибора введен передаточный механизм, увеличивающий масштаб перемещения конца трубки.

Зубчато-секторный передаточный механизм показан на рис. 3.5. Он состоит из зубчатого сектора 9, шестерни 5, сцепляющейся с сектором, и спиральной пружины 6.

На оси шестерни 5 закреплена указывающая стрелка 10 манометра. Пружина 6 одним концом прикреплена к оси шестерни, а другим — к неподвижной точке платы 3 механизма. Пружина, выбирая зазоры в зубчатом зацеплении и шарнирных соединениях передаточного механизма, исключает люфт стрелки.

Мембранный манометр (рис. 3.6). Упругим элементом манометра является гофрированная мембрана 3, края которой зажаты между фланцами чашек 1 и 7. Чашка имеет ниппель 2, которым манометр присоединяют к измеряемому давлению. Верхняя чашка 7 представляет собой одно целое с корпусом манометра 5. В центре мембраны 3 закреплена стойка 4, шарнирно соединенная с поводком 6. Последний соединен с сектором зубчато-секторного передаточного механизма.

Наиболее удобны мембранные манометры для измерения давления вязких жидкостей или химически агрессивных сред.

3.4. ГРУЗОПОРШНЕВОЙ МАНОМЕТР

Принцип действия поршневого манометра основан на уравнивании сил, создаваемых, с одной стороны, измеряемым давлением, а с другой стороны — грузами, действующими на поршень, помещенный в цилиндр (рис. 3.7).

Прибор состоит из колонки 7 с цилиндрическим шлифованным каналом и поршня 6, несущего на своем верхнем конце тарелку 4 для нагружения ее эталонными грузами 5. Поршень 1 винтового пресса служит для подъема и опускания поршня 6 так, чтобы при любых нагрузках поршень 6 был погружен в цилиндр примерно на $\frac{2}{3}$ своей высоты. Камеру 2 поршневого

манометра заполняют трансформаторным, вазелиновым или касторовым маслом через воронку 8. Давление в системе создают с помощью винта с маховиком 9 и поршня 1. Штуцеры 3 служат для установки поверяемого и образцового манометров. Вентиль 10 предназначен для слива масла. В процессе измерений для устранения вредных сил трения поршня 6 о стенки цилиндрического канала колонки 7 поршень 6 вручную приводят во вращение. Поршневой манометр может быть использован для проверки манометров как с помощью грузов, так и с помощью образцового манометра.

3.5. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАНОМЕТРЫ

Тензорезисторные измерительные преобразователи ИП «Сапфир» обеспечивают непрерывное преобразование давления в унифицированный электрический токовый сигнал дистанционной передачи. Действие прибора основано на использовании тензометрического эффекта в полупроводниковом материале.

Воздействие измеряемого параметра, преобразованное в усилие, вызывает изменение напряженного состояния тензорезисторов, жестко соединенных (нанесенных в виде монокристаллической пленки) с чувствительным элементом тензомодуля, который размещен внутри измерительного блока первичного преобразователя. Изменение сопротивления тензорезисторов, пропорциональное изменению величины измеряемого параметра, преобразуется встроенным электронным устройством в токовый выходной сигнал (4—20 мА) первичного преобразователя.

Сигнал 4—20 мА передается по искробезопасной двухпроводной линии дистанционной передачи к блоку питания БПЗ-24

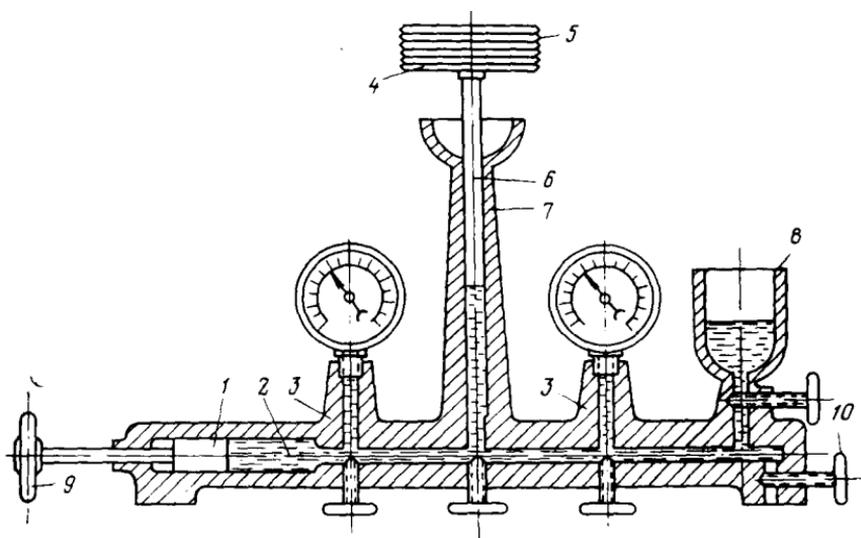
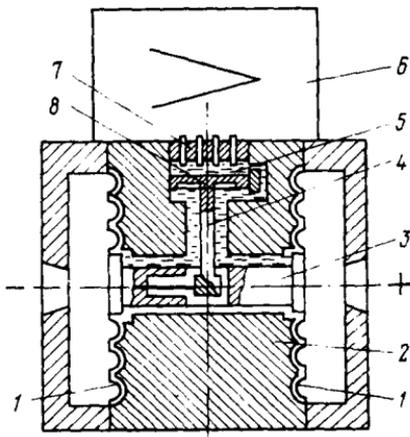


Рис. 3.7. Поршневой манометр

Рис. 3.8. Измерительный блок разности давлений



(по этим же проводам подается питание), где преобразуется в унифицированный токовый выходной сигнал (0—5, 0—20 или 4—20 мА) в зависимости от исполнения прибора.

ИП «Сапфир» состоит из двух конструктивных блоков: первичного преобразователя и блока питания типа БПЗ-24, связанных двухпроводной линией связи. Первичные преоб-

разователи включают измерительный блок, встроенное унифицированное электронное устройство, и различаются лишь конструкцией измерительных блоков.

Измерительные блоки выполнены на основе тензомодулей двух типов (в зависимости от пределов измерения): рычажно-мембранного и мембранного. Схема измерительного блока разности давлений с тензомодулем рычажно-мембранного типа показана на рис. 3.8.

Тензомодуль рычажно-мембранного типа 4 размещен внутри основания 2 в заполненной полиметилсилоксановой жидкостью замкнутой полости и отделен от измеряемой среды металлическими гофрированными мембранами 1. Мембраны по наружному контуру приварены к основанию и соединены между собой центральным штифтом 3, который связан с концом рычага тензомодуля. Разность давлений вызывает прогиб мембран 1 и 8 тензомодуля, а также изменение сопротивления тензорезисторов 5. Электрический сигнал с тензомодуля передается из полости высокого давления во встроенное электронное устройство 6 по проводам через герметичный вывод 7.

При односторонней перегрузке рабочим давлением мембрана 1 после дополнительного перемещения ложится на профилированную подушку, поэтому измерительный блок выдерживает эту перегрузку, не разрушаясь.

В преобразователях избыточного давления, разрежения и избыточного давления — разрежения используются одни и те же измерительные блоки, которые отличаются от измерительных блоков преобразователей разности давлений конструкцией фланцев.

Промышленность выпускает следующие типы ИП «Сапфир»: 651 ДИ и 652 ДИ для избыточного давления; 651 ДА и 652 ДА — для абсолютного давления; 651 ДВ — для разрежения; 651 ДД и 652 ДД — для разности давления, 651 ДГ — для гидростатического давления.

Для измерения давления неагрессивных жидких и газообразных сред и сигнализации при его отклонении от заданного интервала используют приборы типа МП4-III. Прибор состоит из четырех основных узлов (рис. 3.9): узла измерения величины давления, трибкосекторного механизма, контактного устройства, сигнального блока. Перемещение свободного конца манометрической пружины 1 через тягу 9, сектор 10 и трибку 2 преобразуется в поворот показывающей стрелки 6 относительно шкалы 4. Вместе с показывающей стрелкой поворачивается ведущий поводок 7, который перемещает подвижные контактные поводки 5.

Сигнальный блок питается от сети переменного тока через однополупериодный выпрямитель D_1 и стабилизатор D_2 . Нагрузкой предельных контактов 3 и 8 являются электромагнитные реле P_1 и P_2 , служащие для коммутации внешних цепей. Когда величина измеряемого параметра находится в пределах, заданных сигнальными указателями, контакты поводкового контактного устройства разомкнуты: нормально замкнутые контакты реле P_1 и P_2 замыкают цепь выдачи сигнала «Норма». При выходе величины измеряемого параметра за пределы, установленные сигнальными указателями, замыкаются соответствующие контакты поводкового контактного устройства, нормально разомкнутые контактные реле P_1 и P_2 замыкают цепь выдачи сигнала «Минимум» или «Максимум».

На рис. 3.10 показана принципиальная схема сифонного электрического взрывозащищенного манометра типов МС-Э1-В4 и МС-Э2-В4.

Манометр предназначен для непрерывного преобразования давления жидких и газообразных сред, в том числе азотоводородных и аммиачных, в пропорциональный унифицированный электрический выходной сигнал постоянного тока.

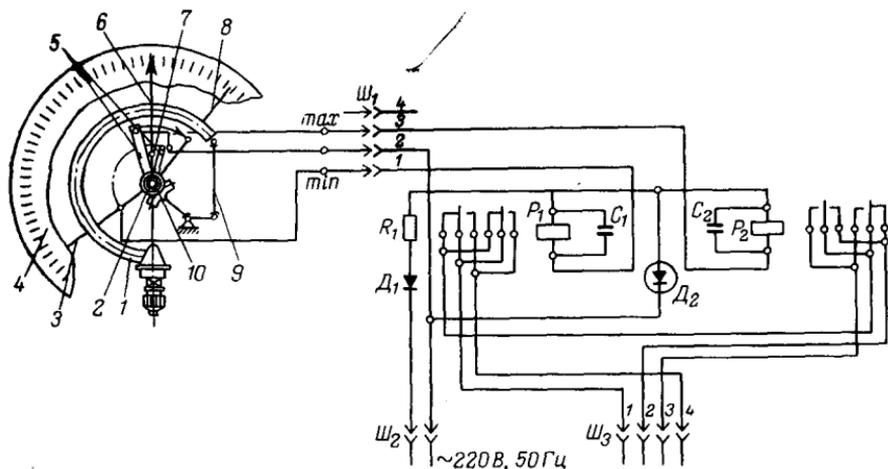


Рис. 3.9. Принципиальная схема прибора типа МП 4-III

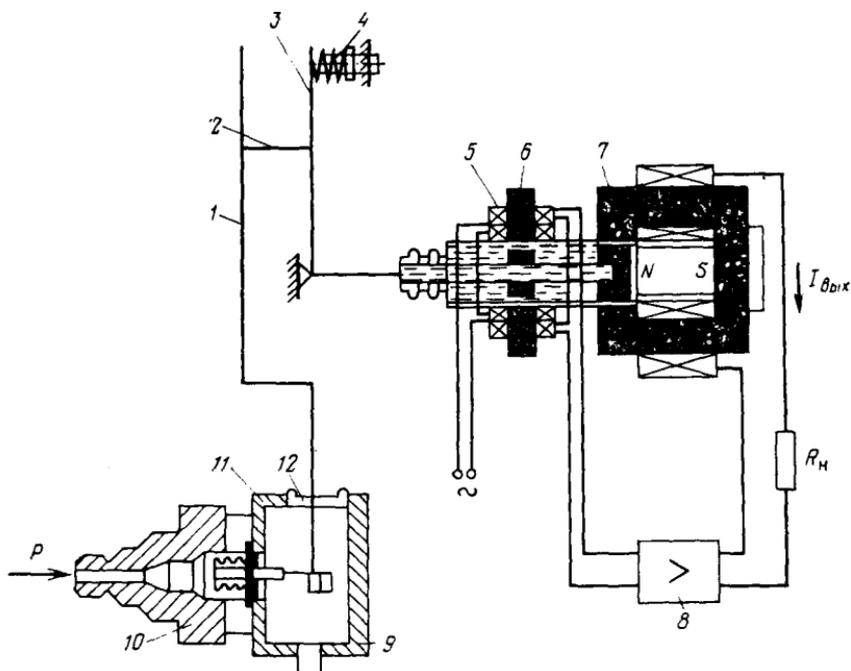


Рис. 3.10. Принципиальная схема сифонного взрывозащищенного электрического манометра:

1, 3 — рычаги; 2 — лента; 4 — пружинный корректор нуля; 5 — плунжер; 6 — индикатор рассогласования; 7 — электромагнитный механизм силовой обратной связи; 8 — электронный усилитель; 9 — сифонный чувствительный элемент; 10 — штуцер для подвода измеряемого давления; 11 — корпус измерительного блока; 12 — мембранный вывод измеряемого усилия из полости измерительного блока

Преобразователи имеют взрывонепроницаемое исполнение (ВЧатЗ) и могут применяться во взрывоопасных помещениях и на взрывоопасных установках всех классов, где возможно образование взрывоопасных смесей категорий 1, 2, 3 и подкатегорий 4а групп Т1, Т2, Т3.

Принцип действия преобразователей — силовая компенсация. Начальное (нулевое) значение токового выходного сигнала устанавливается пружинным корректором нуля 4. Интервал измерения настраивают изменением передаточного отношения рычажного механизма, для этого перемещают ленту 2, передающую усилие с рычага 1 на рычаг 3. Настройка нулевого значения выходного сигнала и диапазона измерения может производиться во взрывоопасном помещении без отключения электрического питания.

3.6. ПНЕВМАТИЧЕСКИЕ МАНОМЕТРЫ

На рис. 3.11 показана принципиальная схема сифонного манометра абсолютного давления типа МАС-П. Манометр абсолютного давления сифонный пневматический МАС-П предна-

значен для непрерывного преобразования абсолютного давления газа в пропорциональный пневматический сигнал дистанционной передачи. Выпускается двух типоразмеров (МАС-П1 и МАС-П2) на одиннадцать различных пределов измерения.

Датчик состоит из блока двойных сильфонов 12 (рис. 3.12), полости которых заполнены кремнийорганической жидкостью. Полости сильфонов сообщаются между собой каналом, который перекрывается клапаном 11 при увеличении деформации сильфонов выше предельной рабочей деформации. При нарушении герметичности мембраны 9 одновременно закрываются оба клапана сильфонных чувствительных элементов, обеспечивая надежную защиту от выброса наружу измеряемой среды в случае разрушения сильфонов, что особенно важно при измерениях перепада давления токсичных и взрывоопасных сред.

На рис. 3.13 показана принципиальная схема манометра типа МП4-У с пневматической передачей показаний на расстояние. Принцип действия измерительной части прибора основан на уравнивании величины измеряемого давления силой упругой деформации одновитковой трубчатой пружины,

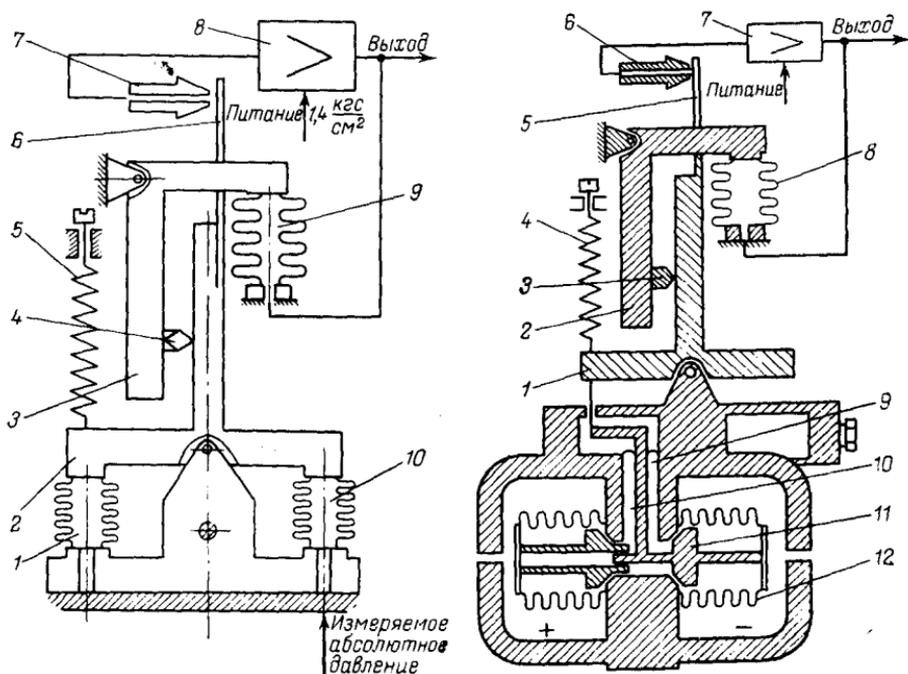


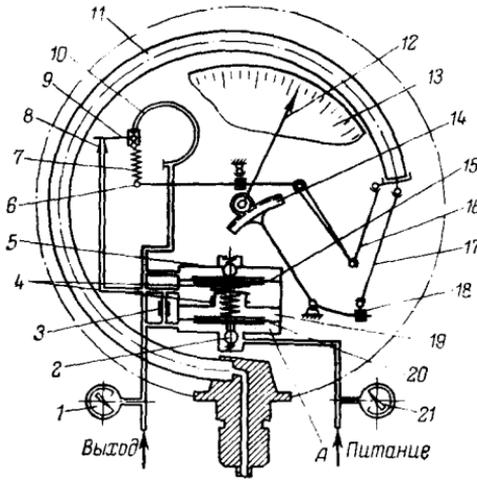
Рис. 3.11. Принципиальная схема манометра МАС-П:

1, 9, 10 — сильфоны; 2, 3 — рычаги; 4 — наездник; 5 — пружина; 6, 7 — сошло-заслонка; 8 — усилитель

Рис. 3.12. Принципиальная схема дифманометра ДС-П:

1, 2, 10 — рычаги; 3 — наездник; 4 — пружина; 5 — заслонка; 6 — сошло; 7 — усилитель; 8, 12 — сильфоны; 9 — мембрана; 11 — клапан

Рис. 3.13. Принципиальная схема манометра МП4-У



а принцип действия пневматической части — на компенсации сил.

Изменение давления, передаваемого во внутреннюю полость трубчатой пружины 11, вызывает перемещение ее свободного конца, которое преобразуется передаточно - множительным механизмом (тяги 17, рычага 18 и трибло-секторной пары 14) в движение стрелки 12 относительно шкалы 13.

Одновременно перемещение конца манометрической пружины передается на заслонку 9 пневмопреобразователя через тягу 16, рычажный механизм 6 и цилиндрическую пружину 7. Заслонка может перемещаться относительно сопла 8.

Пневмопреобразователь работает следующим образом. Питающий воздух под давлением 140 ± 14 кПа, которое контролируется манометром 21, поступает через входное отверстие в усилительное пневмореле 19, где редуцируется шариковым клапаном напора давления 2 до 3—4 кПа и через камеру давления командного воздуха А, а также дроссель 3 поступает в линию сопла 8. При полном открытии сопла 8 заслонкой 9 избыточное давление в линии перед соплом равно нулю, так как отверстие сопла значительно больше отверстия дросселя, а давление командного воздуха определяется силами пружин 4 и составляет 4 кПа. Увеличение давления в линии перед соплом 8 при закрывании его передается на мембрану 15, и шариковый клапан сброса 5 приоткрывает отверстие для выпуска воздуха в атмосферу, а мембрана 20, воздействуя на шариковый клапан напора давления 2, открывает входное отверстие питания. При этом в камере давления командного воздуха давление возрастает на величину повышения давления в линии перед соплом; это давление передается во внутреннюю полость трубчатой пружины обратной связи 10 и на выход прибора. Давление воздуха контролируется по манометру 1.

Под действием давления, передаваемого во внутреннюю полость трубчатой пружины обратной связи 10, пружина деформируется, отводит заслонку 9 от сопла на расстояние, обеспечивающее поддержание в системе давления воздуха, пропорционального измеряемому параметру. Как только заслонка останавливается, увеличение давления в камере давления командного воздуха прекращается, на дросселе 3 устанавливается прежний перепад давления, и вся система уравнивается.

При уменьшении измеряемого прибором давления среды заслонка 9 отходит от сопла 8, что приводит к уменьшению давления в линии перед соплом, а следовательно, и в камере командного воздуха, так как мембраны 15 и 20 перемещаются так, что открывается клапан сброса давления 5 и перекрывается клапан напора 2. Сброс давления будет продолжаться до прекращения движения заслонки, т. е. до установления нового равновесия сил на мембранах. Уменьшенное давление в камере давления командного воздуха А будет передано на выход прибора и во внутреннюю полость пружины обратной связи 10, которая, деформируясь, приблизит заслонку к соплу на расстояние, обеспечивающее поддержание в системе давления, пропорционального измеряемой величине.

Приборы выпускаются с классом точности 1,0 и 1,5. Интервал изменения выходного сигнала 20—100 кПа (0,2—1,0 кгс/см²).

3.7. ВЫБОР, УСТАНОВКА И ЗАЩИТА ОТ КОРРОЗИИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ

Большой интервал измерений давления и различные специфические условия, в которых они производятся на химических заводах, не позволяют дать исчерпывающие указания по установке и эксплуатации манометров в производственных условиях. Однако из многообразия требований, предъявляемых к измерениям, можно выделить некоторые общие, выполнение которых позволит правильно измерять давление и вакуум в любых условиях.

Прежде всего необходимо узнать примерную величину давления, пределы его колебаний, если оно переменное или пульсирующее, а также физико-механические свойства среды. Прибор должен быть выбран с учетом требуемой точности измерения, причем необходимо учитывать ту погрешность, которую дает прибор в условиях эксплуатации под влиянием неблагоприятных внешних факторов (повышенной температуры, вибраций и т. п.). Так как допустимая погрешность прибора, определяющая его класс, выражается в процентах предельного значения шкалы, желательно выбирать такой прибор, пределы шкалы которого были возможно ближе к измеряемому давлению, тогда относительная погрешность будет наименьшей.

Для стабильного или плавно изменяющегося давления допустимое рабочее давление должно находиться в пределах $\frac{1}{2}$ — $\frac{2}{3}$ шкалы прибора, а для колеблющегося давления $\frac{1}{3}$ — $\frac{1}{2}$ шкалы. Для других приборов (не пружинных) допустимое рабочее давление должно быть возможно ближе к предельному значению шкалы прибора.

Кроме указанных факторов, определяющих выбор прибора, необходимо учитывать измеряемую среду, что весьма важно в

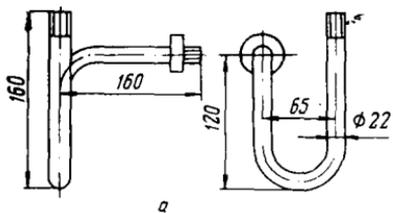
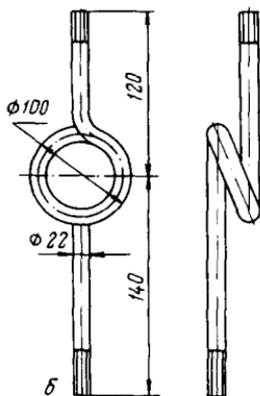


Рис. 3.14. Сифонные трубки:
а — U-образная; б — кольцевая



условиях химических заводов, где почти всегда приходится иметь дело с агрессивными жидкостями и газами. В химической промышленности манометры часто устанавливают на теплообменниках, выларных, экстракционных и дистилляционных аппаратах, автоклавах, сушилках и т. п. В таких случаях необходима защита воспринимающей части манометра (пружины, мембраны) от воздействия газа или пара с высокой температурой. Для этого перед манометром устанавливают так называемую сифонную трубку в виде буквы U или кольцевой петли (рис. 3.14). При измерении давления

горячего газа сифонную трубку заполняют водой. Температура жидкости, заполняющей трубку, вследствие большой теплопотери в окружающую среду и малой теплопроводности близка к температуре окружающего воздуха, поэтому воспринимающая часть прибора предохраняется от нагревания.

Если жидкость, газ, пар или его конденсат химически активны по отношению к материалу воспринимающей части прибора, то вместо сифонной трубки перед манометром устанавливают мембрану или защитный сосуд, заполненный до половины инертной жидкостью (рис. 3.15). Такой жидкостью могут служить глицерин, вазелиновое масло, тяжелые углеводороды, керосин. Разделительная жидкость должна быть инертной по отношению к измеряемой среде и не растворять ее в заметных количествах. Если пары и жидкости способны при охлаждении затвердевать и закупоривать подводящие к манометру трубки, то защитный сосуд необходимо устанавливать вблизи точки отбора давления и обеспечивать подогрев сосуда и подводящей к нему трубки до температуры выше

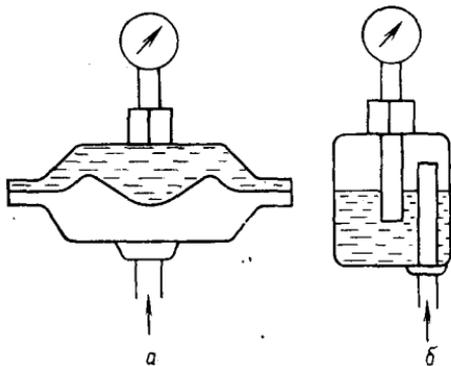


Рис. 3.15. Разделительные устройства:
а — мембранное; б — разделительный сосуд

точки кристаллизации, а манометр удалить от защитного сосуда на некоторое расстояние, заполнив соединяющую трубку жидкостью.

Для защиты от нагревания лучеиспусканием манометр должен быть либо удален от аппарата на достаточное расстояние, либо закрыт экраном, поглощающим тепловые лучи.

Сотрясения, толчки и вибрация сокращают срок службы прибора, ускоряют износ деталей узла передачи манометра, поэтому при измерении давления в аппарате, подверженном сотрясениям, манометр следует устанавливать на отдельном щитке. Перед манометром необходимо предусмотреть приспособление, поглощающее колебания. Такое приспособление (буфер) чаще всего представляет собой дроссель в форме игольчатого вентиля или диафрагмы с очень маленьким отверстием.

Жидкостные и поршневые приборы устанавливают строго по отвесу или уровню. Импульсные линии, передающие давление к манометру, выполняют из металла, стойкого к влиянию измеряемой среды. При измерении давления кислорода уплотнительные прокладки из органических материалов недопустимы.

ГЛАВА 4

КОНТРОЛЬ КОЛИЧЕСТВА И РАСХОДА МАТЕРИАЛОВ

4.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ. ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ

Количество вещества выражают в единицах объема или массы. В системе СИ за единицу объема принят кубический метр (м^3), а за единицу массы — килограмм (кг). Количество газа измеряют объемным методом. Для получения сравнимых результатов измерений необходимо объем газа привести к следующим нормальным условиям: температура 20°C ($293,15\text{ K}$), давление 101325 Па (760 мм рт. ст.), относительная влажность $\varphi=0$. Для твердых и сыпучих тел пользуются понятием насыпной или объемной массы. Насыпная масса сыпучего материала не имеет постоянного значения; она зависит от гранулометрического состава сыпучего материала, т. е. от размера частиц и количественного содержания частиц различной величины в общей массе сыпучего материала. Поэтому количество сыпучего материала определяют взвешиванием.

Приборы, измеряющие количество вещества, называются *счетчиками*. Счетчики измеряют протекающий через них объем вещества за любой промежуток времени: сутки, месяц и т. д. Количество вещества при этом определяется как разность показаний счетчика.

Расходом вещества называется количество вещества, проходящее через данное сечение канала в единицу времени. *Массовый расход* определяется в килограммах за секунду, а *объемный расход* в кубических метрах за секунду. Приборы, изме-

ряющие расход, называются *расходомерами*. Эти приборы могут быть снабжены счетчиками (интеграторами), тогда они называются расходомерами со счетчиком. Такие расходомеры позволяют измерять расход и количество вещества.

По ГОСТ 15528—70 в зависимости от принятого метода измерения приборы для измерения расхода и количества подразделяются на: расходомеры переменного перепада давлений, основанные на зависимости от расхода перепада давления, создаваемого неподвижным устройством, установленным в трубопроводе, или элементом трубопровода, и расходомеры постоянного перепада давлений, основанные на зависимости от расхода вещества вертикального перемещения тела (поплавка), изменяющего при этом площадь проходного отверстия прибора таким образом, что перепад давлений по обе стороны поплавка остается постоянным.

Электромагнитные расходомеры основаны на зависимости от расхода результата взаимодействия движущейся жидкости с магнитным полем.

4.2. ИЗМЕРЕНИЕ КОЛИЧЕСТВА ЖИДКОСТИ И ГАЗА

Количество жидкости или газа можно измерить счетчиками. По принципу действия счетчики подразделяются на объемные, массовые и скоростные. Для измерения количества жидкости применяют преимущественно объемные и скоростные счетчики, для измерения объема газа — объемные счетчики. Для каждого счетчика существует определенный минимальный расход, ниже которого резко возрастает основная погрешность.

Номинальным называется наибольший длительный расход, при котором погрешность измерения не выходит за пределы установленных норм, а потеря напора не создает в счетчике усилий, приводящих к быстрому износу его деталей.

Характерным расходом называется количество вещества, которое проходит через счетчик за 1 ч при установившемся потоке и потере напора 0,1 МПа. Характерный расход является условной величиной и служит мерой оценки счетчиков различных конструкций.

Потери напора представляют собой разность давлений на входе в счетчик и выходе из него. *Калибром счетчика* называется диаметр условного прохода входного патрубка, выраженный в миллиметрах.

Скоростные счетчики. Эти счетчики служат для измерения количества жидкостей. Они основаны на принципе измерения средней скорости движущегося потока. Количество жидкости связано со средней скоростью движущегося потока соотношением

$$Q = v_{cp}S, \quad (4.1)$$

где v_{cp} — средняя скорость движения вещества, м/с; S — поперечное сечение потока, м².

О количестве жидкости, прошедшей через прибор, судят по числу оборотов лопастной вертушки, расположенной на пути потока. Считается, что скорость вращения вертушки пропорциональна средней скорости потока

$$n = c v_{\text{ср}}; \quad (4.2)$$

с учетом уравнения (4.1)

$$n = c (Q \cdot S), \quad (4.3)$$

где n — число оборотов вертушки; c — коэффициент пропорциональности, характеризующий механические и гидравлические свойства прибора.

По форме вертушки скоростные счетчики разделяются на две группы: с винтовой вертушкой и крыльчатые. Винтовые вертушки размещают параллельно измеряемому потоку, крыльчатые — перпендикулярно ему.

На рис. 4.1 показан скоростной счетчик с винтовой вертушкой, закрепленной на горизонтальной оси. В корпусе 1, снабженной фланцами для присоединения к трубопроводу, установлена вертушка 2 с лопастями, изогнутыми по винтовой линии.

Вертушку изготовляют из пластмассы при рабочей температуре до 30°C и из латуни при более высоких температурах.

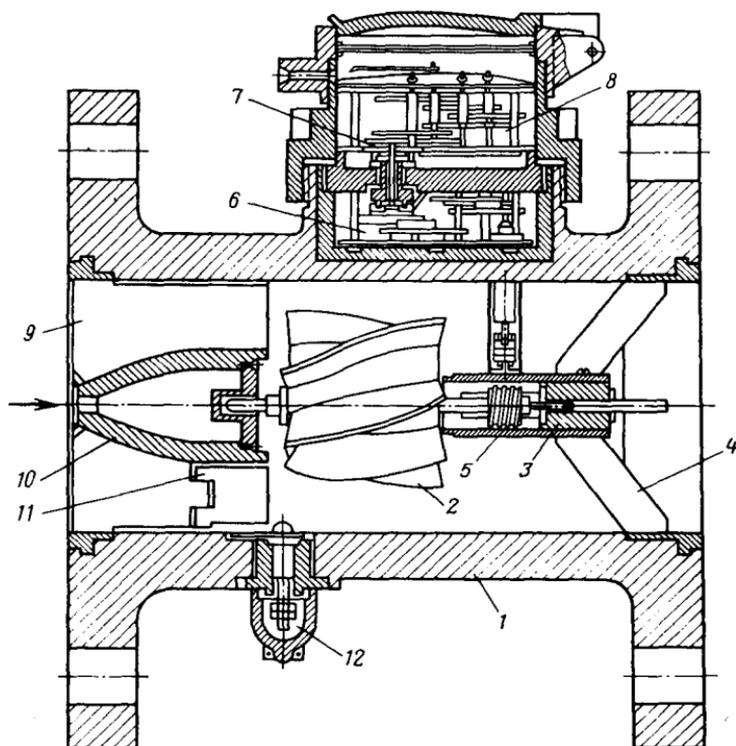
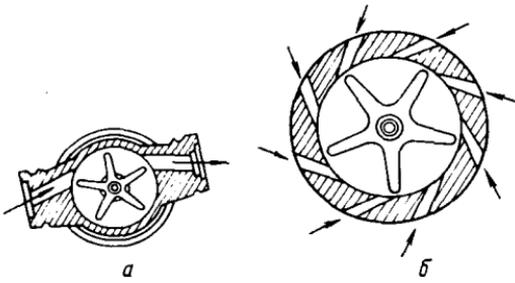


Рис. 4.1. Скоростной счетчик с винтовой вертушкой

Рис. 4.2. Одноструйный (а) и многоструйный (б) счетчики



Вертушку делают легкой для уменьшения ее веса и давления на цапфы. На ось вертушки перед задним закрытым подшипником

3, закрепленным в крестовине 4, насажен червяк 5, сцепляющийся с червячной шестерней, передающей вращение передаточному механизму 6. От механизма движение передается оси, проходящей через сальник 7, и счетному механизму 8.

Перед вертушкой со стороны входа жидкости установлен струевыпрямитель 9, состоящий из нескольких радиально закрепленных прямых пластин. Конец одной из пластин струевыпрямителя поворачивается вокруг вертикальной оси, образуя лопасть 11, служащую для регулирования счетчика через рычажный привод 12. В струевыпрямителе закреплен передний подшипник 10 оси вертушки. Механическое сопротивление (трение в подшипниках, сальнике и т. п.) влияет на скорость вращения вертушки, а при некоторой минимальной скорости потока вертушка будет неподвижна.

В зависимости от способа подвода жидкости счетчики с крыльчатой вертушкой подразделяются на одноструйные и многоструйные (рис. 4.2).

Как в одноструйных, так и в многоструйных счетчиках жидкость подводится тангенциально к лопастям вертушки. Счетчики с крыльчатой вертушкой устанавливают на горизонтальных участках трубопроводов.

Счетчики с винтовой вертушкой применяют при давлении жидкости до 1,0 МПа и при длительной нагрузке до 600 м³/ч. Погрешность счетчиков от ± 2 до $\pm 3\%$ действительного значения.

Объемные счетчики. Принцип работы объемных счетчиков заключается в измерении определенного объема жидкости, вытесняемого из измерительной камеры под воздействием разности давлений.

Для применения на напорных технологических линиях выпускают объемные лопастные счетчики типа ЛЖ. Принцип действия лопастных счетчиков основан на том, что поток измеряемой жидкости, поступая через входной патрубок, проходит через измерительную камеру, где теряет часть напора на создание крутящего момента, приводящего во вращение ротор с выдвигаемыми лопастями.

Измерение объемного количества жидкости происходит при периодическом отсекании определенных объемов жидкости, за-

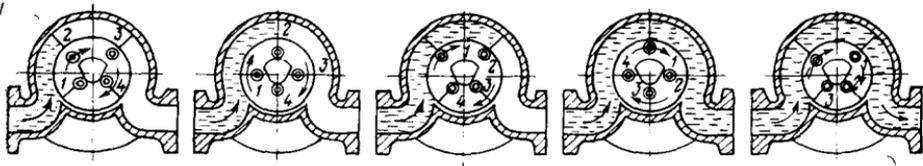


Рис. 4.3. Схема действия роторного счетчика

ключенных в полости между двумя лопастями и цилиндрическими поверхностями измерительной камеры и барабана. За один полный оборот ротора отсекаются четыре объема, сумма которых равна емкости измерительной камеры. На рис. 4.3 показано несколько положений ротора, иллюстрирующих части цикла, в течение которого ротор совершает пол-оборота, что соответствует половине емкости измерительной камеры.

В обозначении типа счетчика первое число после букв — диаметр условного прохода счетчика, второе число — рабочее давление, на которое рассчитан счетчик. Лопастные счетчики с обозначением ЛЖА предназначены для агрессивных жидкостей.

Барабанные счетчики. Работа этих счетчиков основана на непрерывном отмеривании и отсчете равных объемных порций газа. Число этих объемов регистрируется счетным механизмом (рис. 4.4).

В герметичном цилиндрическом кожухе 1, заполненном несколько более чем наполовину затворной жидкостью, вращается concentрично расположенный барабан 2, разделенный четырьмя радиальными и одной цилиндрической перегородками на пять камер I—V. Камеры I—IV сообщаются с пространством кожуха 1 щелями a, b, c, d и с внутренней камерой V через щели a_1, b_1, c_1 и d_1 .

В камеру V через поперечную ось входит подающая газ труба 3, а в верхней части кожуха установлена отводящая труба 4. Радиальные перегородки и соединяющие щели расположены так, что газ последовательно заполняет камеры I—IV. Перепад давлений в трубах 3 и 4 заставляет барабан вращаться по часовой стрелке. Входная и выходная щели каждой камеры никогда не могут быть одновременно над уровнем жидкости, следовательно, прямой переток газа из трубы 3 в трубу 4 исключается. Каждая камера заполняется определенным постоянным объемом газа, вытесняемым из камеры в кожух прибора при выходе выпускной щели из

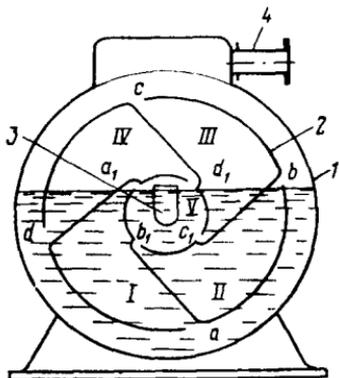


Рис. 4.4. Барабанный счетчик

под уровня запирающей жидкости. Вращение барабана 2 передается счетному механизму, расположенному снаружи кожуха. За один оборот через барабан проходит объем газа, равный сумме объемов камер, отсекаемых жидкостью.

Запирающей жидкостью служит обычно вода. В случае опасности замерзания воды используют водный раствор хлорида магния или глицерин. Барабанные счетчики применяют для измерения светильного, газогенераторного, коксового и других нейтральных газов, заметно не растворяющихся в затворной жидкости и не воздействующих на материал счетчика. Обязательным условием работы барабанных газовых счетчиков является постоянство уровня жидкости в кожухе счетчика. Для контроля уровня жидкости счетчик снабжают водомерным стеклом или устройством для поддержания постоянства уровня.

Барабанные счетчики газа представляют собой очень точные приборы, их погрешность не превышает $\pm 0,2\%$. Однако они редко выпускаются производительностью более $3 \text{ м}^3/\text{ч}$, так как при большой производительности габариты их слишком велики.

Ротационные счетчики. Счетчики газа ротационные типа РГ предназначены для измерения объемного количества очищенных неагрессивных горючих газов, используемых в установках коммунальных и промышленных предприятий (природного, сланцевого, генераторного, водяного, коксового, доменного, светильного, масляного, смешанного, пропан-бутана).

Ротационные счетчики РГ состоят из трех основных узлов: корпуса, счетного механизма и дифференциального манометра. В корпусе размещены два ротора восьмеричной формы, удерживаемые во взаимно перпендикулярном положении двумя парами шестерен, которые смонтированы на шейках роторов. При протекании газа через счетчик давление на выходе несколько ниже, чем на входе, поэтому роторы вращаются в направлениях, указанных стрелками на рис. 4.5. За каждый оборот роторов счетчик пропускает постоянный объем газа. Вращательное движение роторов передается счетному механизму, установленному на передней крышке счетчика. Счетный механизм показывает объем прошедшего через счетчики газа в кубометрах. Для наблюдения за нормальной работой счетчика служит дифференциальный манометр, разность уровней подкрашенной воды которого показывает потерю напора в счетчике.

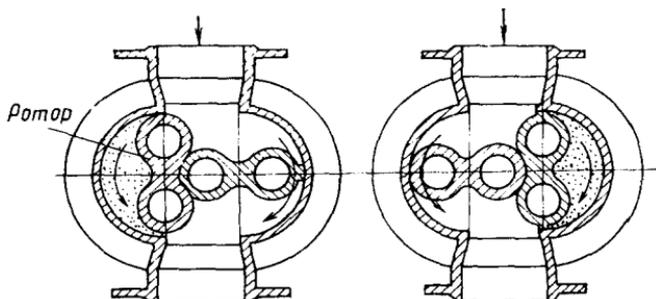
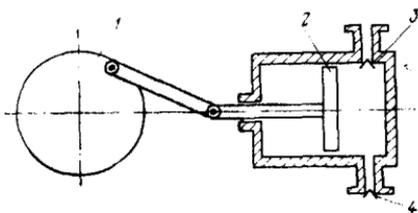


Рис. 4.5. Схема движения газа в ротационном счетчике

Рис. 4.6. Поршневой насос дозатора

Ротационные счетчики типа РГ рассчитаны на расход до $1000 \text{ м}^3/\text{ч}$; погрешность показаний $\pm 2,5\%$.

Насосы-дозаторы с возвратно-поступательным движением поршня (рис. 4.6) служат для дозирования различных химически активных жидкостей. На всасывающей и нагнетательной линиях этих насосов установлены клапаны. Когда привод *1* перемещает поршень *2* справа налево, происходит наполнение цилиндра через входной клапан *3*, а когда поршень, достигнув крайнего положения, перемещается слева направо, клапан *3* на входе закрывается, а клапан *4* на выходе открывается, и жидкость вытесняется в приемное устройство.



4.3. ИЗМЕРЕНИЕ КОЛИЧЕСТВА ТВЕРДЫХ ВЕЩЕСТВ

Устройства измерения и дозирования массы широко распространены в промышленности. Эти устройства предназначены либо для получения измерительной информации о массе вещества — средства измерения, либо для получения измерительной информации и автоматического порционирования требуемой массы вещества — средства дозирования (автоматические дозаторы).

Средства дозирования массы по месту, занимаемому в управляемом технологическом процессе, могут выполнять и дополнительную функцию — исполнительных устройств системы управления. Функция исполнительного устройства реализуется средствами дозирования тогда, когда они используются для подачи в управляемый объект заданного количества сырья и полуфабрикатов.

По назначению средства измерения и дозирования массы подразделяют на пять основных групп: весы и дозаторы весовые порционные, весы транспортные, весы монорельсовые, весы и дозаторы автоматические непрерывного действия и весы специальные технологические.

Весы и дозаторы весовые порционные. Весы и дозаторы весовые порционные предназначены для суммарного учета материалов в потоке и для дозирования и фасовки сыпучих и жидких материалов.

К циферблатным приборам относятся те устройства, работа которых основана на уравновешивании силы тяжести взвешиваемого материала

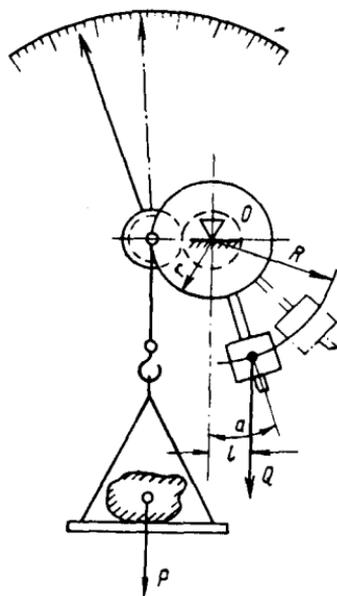


Рис. 4.7. Квадрантные весы

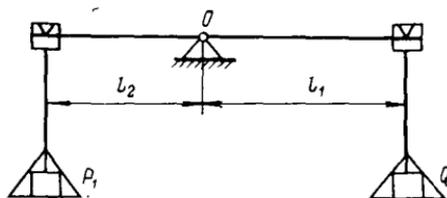


Рис. 4.8. Рычажные весы с постоянными плечами

при помощи квадранта циферблатного указателя. Принципиальная схема квадратных весов показана

на рис. 4.7. В квадратных весах момент силы тяжести груза P уравнивается моментом силы тяжести постоянного груза Q . Груз P лежит на чаше весов, подвешенной на гибкой ленте, огибающей шкив постоянного радиуса r . Момент M_1 от силы тяжести равен

$$M_1 = Pr. \quad (4.4)$$

Уравнивающий груз укреплен на конец рычага (квадранта) и создает момент M_2

$$M_2 = QR \sin \varphi, \quad (4.5)$$

где φ — угол между рычагом и вертикальной осью.

Из условия равновесия квадранта

$$Pr = QR \sin \varphi, \quad (4.6)$$

откуда

$$P = Q(R/l) \sin \varphi \quad (4.7)$$

или

$$\sin \varphi = kP. \quad (4.8)$$

Следовательно, каждому значению силы тяжести соответствует вполне определенный угол поворота квадранта, а следовательно, и шкива. С валом шкива соединен указатель весов.

В рычажных весах к концам рычага подвешены чашки (рис. 4.8) на расстоянии l_1 и l_2 от точки опоры 0 . На одну чашку помещают определяемую массу P_1 на другую известную массу Q .

В равновесном состоянии

$$P_1 l_2 = Q l_1. \quad (4.9)$$

или

$$P = (l_1/l_2) Q. \quad (4.10)$$

Отношение l_1/l_2 может быть постоянным или переменным. При постоянном отношении при взвешивании изменяют массу Q (гири).

На рис. 4.9 показан конструктивный чертеж автоматических весов для дозирования полиэтилена типа ДСС-20НП.

Весы состоят из следующих основных узлов: счетчика 1, электрооборудования 2, циферблатного указательного прибора 3, привода 4, неравноплечей рычажной системы 5, ковша 6, рамы 7 с автоматическим механизмом и приводом, воздушной системы 8, щечкового питателя 9 и станции управления (на рисунке не показана). Величина порции, необходимой для дозирования, заранее задается вручную на циферблатном приборе установкой задающих стрелок с бесконтактными датчиками против соответ-

ствующих делений шкалы. Весы включают в работу кнопкой или от внешнего импульса. Полиэтилен подается шнековым питателем в ковш, который подвешен на одном из плеч главного рычага неравноплечей рычажной системы.

По мере заполнения взвешиваемым материалом ковш перемещается и через рычажную систему передает свое движение стрелке циферблатного указательного прибора. При приближении массы порции, набранной в ковше, к заданной величине электродвигатель привода питателя системой автоматики переключается с большого числа оборотов на меньшее, и начинается досыпка.

Когда порция материала в ковше достигает заданной величины, срабатывает система автоматики, которая включает электродвигатель привода питателя, закрывает заслонку питателя и автоматически или после получения команды (импульса) включает пневматический цилиндр открытия заслонки ковша. Взвешенная порция материала высыпается из ковша. Заслонка ковша закрывается под действием собственного веса, при этом срабатывает счетчик, фиксируя взвешенную порцию. После закрытия заслонки ковша цикл взвешивания повторяется.

Весы снабжены механическим пятизначным счетчиком количества отвешиваемых порций. Точность отвешивания контролируется по шкале циферблатного указательного прибора. Класс точности весов 1,5.

Для дозирования сыпучих материалов применяют ленточные весовые дозаторы с пневматическим вибрационным питателем и пневматическим регулятором. Эти дозаторы используют там, где не допускается применение электромагнитных вибраторов.

Работа дозатора основана на сравнении действительной массы дозируемого материала с заданной. Пропорционально

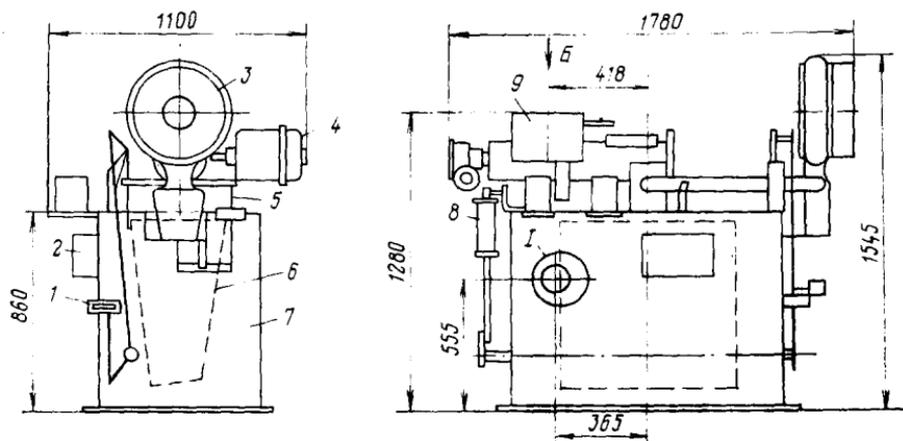


Рис. 4.9. Конструктивно-габаритный чертеж автоматических весов

изменению весовой нагрузки на транспортер изменяется давление сжатого воздуха. Погрешность автоматических весовых дозаторов составляет $\pm 2\%$ от максимального значения шкалы вторичного прибора. При постоянной скорости транспортера производительность весовых дозаторов равна (в кг/с)

$$Q_T = q_T v_T, \quad (4.11)$$

где q_T — масса на ленте транспортера, кг/м на единицу длины; v_T — постоянная скорость движения ленты транспортера, м/с.

Применение современных электронных и пневматических приборов в весовых дозаторах с электромагнитными пневматическими вибропитателями позволяет использовать весы в качестве воспринимающих элементов в системах комплексной автоматизации непрерывных технологических процессов.

4.4. ИЗМЕРЕНИЕ РАСХОДА МЕТОДОМ ПЕРЕМЕННОГО ПЕРЕПАДА ДАВЛЕНИЙ

Основы теории. Из парка существующих расходомеров около 80% составляют расходомеры переменного перепада давлений. Такое широкое их применение объясняется невысокой стоимостью, простотой конструкции и эксплуатации, а также отсутствием необходимости в дорогостоящих образцовых установках для градуировки. Из более чем двухсот типов используемых в мировой практике расходомеров эти расходомеры являются единственными нормализованными средствами измерения расхода. У нас в стране данные расходомеры нормализованы новым руководящим документом РД 50-213—80, который введен в действие взамен Правил 28—64.

Известно, что объемный расход вещества, протекающего по трубопроводу, определяется как произведение скорости потока на площадь отверстия истечения F , т. е.

$$Q = vF. \quad (4.12)$$

Массовый расход G получают умножением объемного расхода Q на плотность ρ жидкости, газа или пара, т. е.

$$G = Q\rho. \quad (4.13)$$

При прохождении вещества через сужающее устройство, установленное в трубопроводе, скорость его увеличивается. Это следует из условия неразрывности струи

$$Q = v_1 F = v_2 f, \quad (4.14)$$

где F и f — соответственно площади сечения трубопровода и сужающего устройства; v_1 и v_2 — средние скорости движения вещества в трубопроводе и в сужающем устройстве.

Более высокая скорость v_2 по сравнению с v_1 обусловлена переходом части потенциальной энергии потока в кинетическую.

Рис. 4.10. Вид потока и распределение давления при размещении сужающего устройства в трубопроводе

Из уравнения (4.14) следует, что

$$v_2 = (F/f) v_1, \quad (4.15)$$

т. е. при постоянном отношении F/f скорость v_2 тем больше, чем выше скорость v_1 вещества в трубопроводе или чем больше расход. Отношение f/F называют модулем сужающего устройства и обозначают через m , т. е.

$$m = f/F = d^2/D^2, \quad (4.16)$$

где d и D — соответственно диаметры проходных сечений сужающего устройства и трубопровода.

Из уравнений (4.15) и (4.16) получим

$$v = v_1/m. \quad (4.17)$$

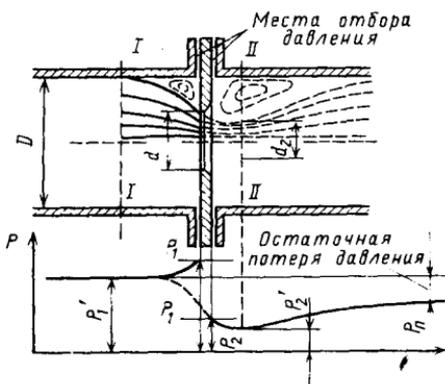
На рис. 4.10 показаны вид потока и изменение давления измеряемой среды при прохождении ее через сужающее устройство. Если до сужающего устройства статическое давление в трубопроводе равно P'_1 , то в сужающем устройстве оно резко падает, затем постепенно возрастает до нового установившегося значения. При этом давление в трубопроводе за сужающим устройством не достигает значения P''_1 , так как часть энергии расходуется на трение о стенки сужающего устройства и завихрения потока после сужающего устройства. Величина безвозвратных потерь равна P_n . Перед сужением давление несколько возрастает до P_1 , что обусловлено сжатием потока перед сужающим устройством.

Минимальное давление P'_2 наблюдается на некотором расстоянии от сужающего устройства. Давление в проходном сечении сужающего устройства равно P_2 . Разность давлений $P_1 - P_2$ является перепадом, зависящим от расхода среды, протекающей через трубопровод. Найдем зависимость между перепадом давлений за сужающим устройством и расходом. В соответствии с уравнением Бернулли для сечения I—I и II—II для горизонтального участка трубопровода (см. рис. 4.10).

$$P_2/\rho_2 + v_1^2/2 = P_2/\rho_2 + v_2^2/2 \quad (4.18)$$

$$\text{или } P_1/\rho_1 - P_2/\rho_2 = (v_2^2 - v_1^2)/2, \quad (4.19)$$

где ρ_1 и ρ_2 — соответственно плотности измеряемой среды в сечениях I—I и II—II.



Для несжимаемой жидкости $\rho_1 = \rho_2 = \rho$. Тогда

$$P_1 - P_2 = (v_2^2 - v_1^2) \rho / 2. \quad (4.20)$$

Из уравнения (4.16) следует, что $v_1 = m v_2$. Подставляя в уравнение (4.20) значение v_1 из (4.16), получим

$$P_1 - P_2 = \rho (v_2^2 - m^2 v_2^2) / 2 = \rho [(1 - m^2) / 2] v_2^2. \quad (4.21)$$

Решая уравнение (4.21) относительно v_2 , получим

$$v_2 = (1/\sqrt{1 - m^2}) \sqrt{2(P_1 - P_2) \rho}. \quad (4.22)$$

Измерить давление в сечении II—II практически невозможно. Перепад давлений обычно измеряют на участках трубопровода перед сужающим устройством и за ним, где перепад $P'_1 - P'_2$ отличается от рассматриваемого и несколько больше, чем $P_1 - P_2$. Введя в уравнение (4.22) поправочный коэффициент μ , получим

$$v_2 = \mu / \sqrt{1 - m^2} [\sqrt{2(P_1 - P_2) \rho}]. \quad (4.23)$$

Определение поправочного коэффициента μ в каждом конкретном случае практически не представляется возможным. Он зависит от характера движения жидкости или газа и является функцией критерия (числа) Рейнольдса Re . Для различных типоразмеров сужающих устройств на основе большого числа экспериментов найдены коэффициенты α , равные первому члену правой части равенства (4.23), т. е.

$$\alpha = \mu / \sqrt{1 - m^2}. \quad (4.24)$$

Этот коэффициент, учитывающий расхождение между теоретической и действительной скоростями, называется коэффициентом расхода. Подставляя значение α из уравнения (4.24) в уравнение (4.23), получим

$$v_2 = \alpha \sqrt{(2/\rho) (P_1 - P_2)}, \quad (4.25)$$

где P_1 и P_2 — давление в трубопроводе по обе стороны сужающего устройства.

В соответствии с (4.12) уравнения расхода для несжимаемой жидкости в объемных (в м³/с) и массовых (кг/с) единицах будут соответственно иметь вид

$$Q = \alpha f \sqrt{(2/\rho) (P_1 - P_2)}; \quad (4.26)$$

$$Q_m = \alpha f \sqrt{2\rho (P_1 - P_2)}, \quad (4.27)$$

где P_1 и P_2 — давления, Па; ρ — плотность, кг/м³; f — площадь, м².

Коэффициент расхода является функцией модуля и критерия Рейнольдса, т. е.

$$\alpha = f(m Re). \quad (4.28)$$

При измерении расхода сжимаемых сред (газов и паров), особенно при больших перепадах давлений в сужающем устройстве, необходимо учитывать уменьшение плотности ρ , вы-

Рис. 4.11. Расходомер

званное снижением давления при прохождении через сужающее устройство, поэтому массовый расход (а также объемный), отнесенный к начальному значению ρ , несколько уменьшится.

Время прохождения газов и паров через сужающее устройство настолько незначительно, что их сжатие и последующее расширение происходят практически без обмена тепла с окружающей средой, т. е. адиабатически. Поэтому уравнения расхода для газов и паров соответственно в объемных и массовых долях имеют вид

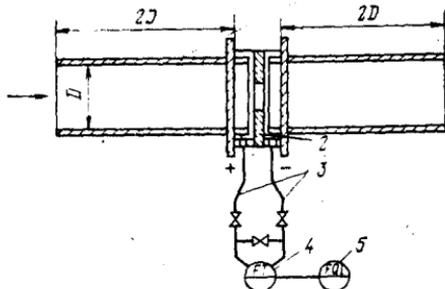
$$Q = \alpha \epsilon f \sqrt{(2/\rho) (P_1 - P_2)}; \quad (4.29)$$

$$Q_m = \alpha \epsilon f \sqrt{2\rho_1 (P_1 - P_2)}, \quad (4.29a)$$

где ϵ — поправочный множитель на расширение измеряемой среды, называемый коэффициентом расширения; ρ_1 — плотность потока перед входом потока в отверстие сужающего устройства.

Уравнения (4.29) и (4.29a) действительны до тех пор, пока скорость потока в сужающем устройстве остается меньше критической, т. е. меньше скорости звука в данной среде. Уравнения расхода для газов и паров отличаются от уравнений расхода для несжимаемой жидкости только коэффициентом ϵ . Значения коэффициента расширения ϵ для различных сужающих устройств и разных случаев измерения даны в приложениях 9 и 10 Правил РД 50-213—80. Расходомер (рис. 4.11) состоит из следующих основных частей: измерительных участков трубопровода 1 до и после сужающего устройства; сужающего устройства 2; расходомерного дифференциального манометра 4; интегрирующего устройства 5, определяющего расход за определенный промежуток времени (смену, сутки); импульсных линий 3, служащих для соединения с дифманометром измерительных участков трубопровода. Требования к исполнению и монтажу измерительных участков трубопровода изложены в разделе 10 Правил РД 50-213—80. Эти правила устанавливают требования к выполнению расходомерных устройств при их разработке, проектировании, монтаже, эксплуатации и поверке.

Стандартные сужающие устройства. К стандартным (нормализованным) сужающим устройствам относятся диафрагмы, сопла и трубы Вентури, удовлетворяющие требованиям Правил РД50-213—80. Они служат для измерения расхода вещества и не имеют индивидуальной градуировки. Допустимые интервалы диаметров трубопроводов D и относительных площадей



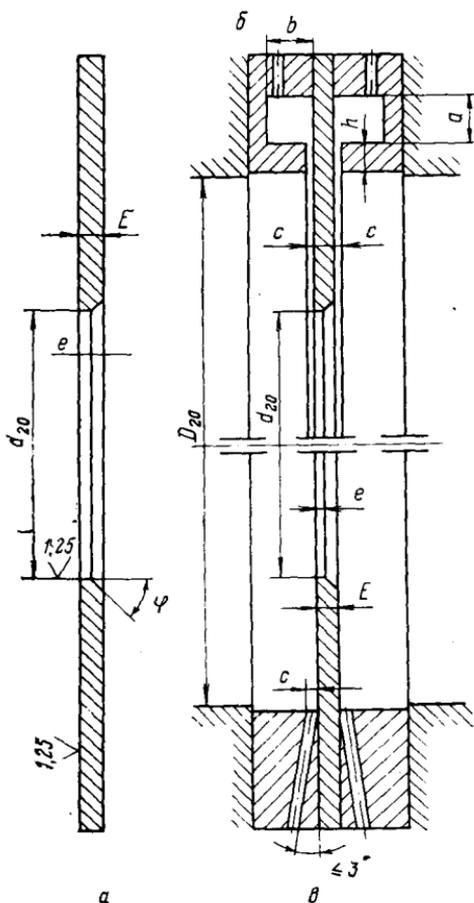


Рис. 4.12. Основные геометрические размеры камерных стандартных диафрагм

сужающих устройств m должны находиться в следующих пределах: $50 \text{ мм} \leq D \leq 1000 \text{ мм}$; $0,05 \leq m \leq 0,64$ для диафрагм с угловым способом отбора перепада давлений; $50 \text{ мм} \leq D \leq 760 \text{ мм}$; $0,04 \leq m \leq 0,56$ для диафрагм с фланцевым способом отбора перепада давлений; диаметр отверстия диафрагмы независимо от способа отбора перепада давлений $d \geq 12,5 \text{ мм}$; $50 \text{ мм} \leq D$; $0,05 \leq m \leq 0,64$ для сопел в случае измерения расхода газа; $30 \text{ мм} \leq D$; $0,05 \leq m \leq 0,64$ для сопел в случае измерения расхода жидкости; $0,65 \text{ мм} \leq D \leq 500 \text{ мм}$; $0,05 \leq m \leq 0,60$ для сопел Вентури диаметр отверстия сопел и сопел Вентури $d \geq 15 \text{ мм}$; $50 \text{ мм} \leq D \leq 1400 \text{ мм}$, $0,10 \leq m \leq 0,60$ для труб Вентури.

В случае измерения расхода газа отношение абсолютных давлений на выходе из сужающего устройства и входе в него должно быть больше или равно 0,75.

При измерении расхода газов и жидкостей допускается применять как угловой (см. рис. 4.12, в), так и фланцевый (см. рис. 4.12, б) способы отбора перепада давлений на диафрагмах и угловой способ отбора на соплах.

Камерные диафрагмы (рис. 4.12, а) применяют для установки в трубопроводах диаметром D_{20} до 500 мм. Стандартные камерные диафрагмы обозначаются ДК, а дисковые ДН. Обычно в обозначении диафрагм после букв указывают максимальное условное давление P_y , на которое рассчитана диафрагма. Например, ДК6 (на 6 кгс/см²).

Перепад давлений при фланцевом способе отбора следует измерять через отдельные цилиндрические отверстия.

Стандартные сопла могут применяться без индивидуальной градуировки в трубопроводах $D_{20} \geq 50 \text{ мм}$ при условии, что $0,05 \leq m \leq 0,65$.

Рис. 4.13. Основные геометрические параметры сопел:

а — для $m < 0,444$; б — для $m > 0,444$

Сопла особенно удобны для измерения расхода газов и перегретого пара, если $[(P_1 - P_2)/P_1] < 0,1$, а также для измерения расхода пара высокого давления и агрессивных газов в трубопроводах диаметром $D_{20} \leq 200$ мм. По сравнению с диафрагмами они менее чувствительны к коррозии, загрязнениям и обеспечивают несколько большую точность измерения. Форма стандартного сопла и его основные геометрические параметры показаны на рис. 4.13.

Стандартные сопла Вентури могут применяться без индивидуальной градуировки для диаметров трубопроводов D_{20} 50 мм при

$$m = 0,05 + 0,6 \quad \text{и} \quad \text{при} \quad d_{20} \geq 20 \text{ мм.}$$

Сопло Вентури (рис. 4.14) состоит из профильной входной части, цилиндрической средней части и выходного конуса. Сопло Вентури может быть длинным и коротким: у первого наибольший диаметр выходного конуса равен диаметру трубопровода, у второго — меньше. Перепад давлений следует измерять через кольцевые камеры.

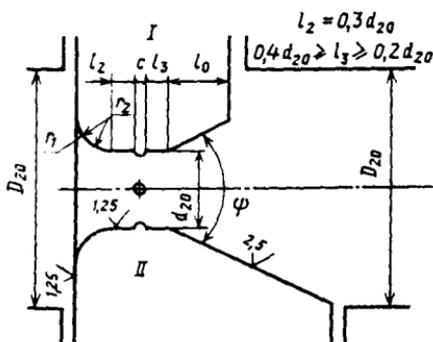
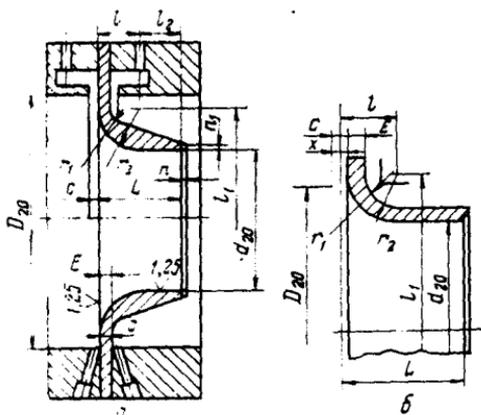
Стандартные трубы Вентури можно применять в трубопроводах диаметром от 100 до 800 мм при условии, что $0,2 \leq m \leq 0,5$. Труба Вентури называется длинной, если наибольший диаметр выходного конуса равен диаметру трубопровода, или короткой, если указанный диаметр меньше диаметра трубопровода.

Давления в горловине и входном патрубке следует отбирать через отверстия в стенках и через осредняющие камеры.

К преимуществам труб Вентури следует отнести меньшую потерю давления по сравнению с потерями в сужающих устройствах других типов.

Рис. 4.14. Основные геометрические параметры сопел Вентури:

I — короткое; II — длинное для $m < 0,444$, при $m > 0,444$ профиль выполняется аналогично соплу с $m < 0,444$



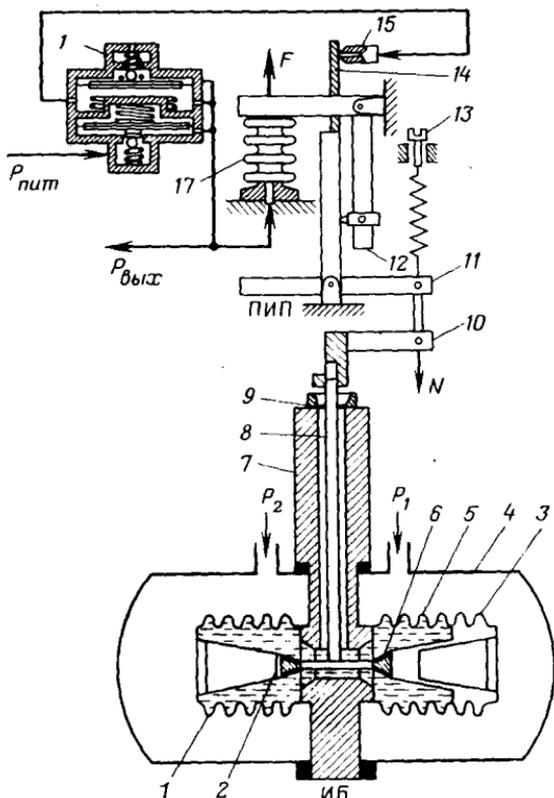


Рис. 4.15. Дифманометр ДСП-3

Расходомерные дифманометры. Расходомерные дифманометры обычно устанавливают совместно с диафрагмами, перепад давления на которых однозначно связан с расходом среды, протекающей по трубопроводу.

На рис. 4.15 показана принципиальная схема дифманометра типа ДСП-3, предназначенного для непрерывного преобразования расхода водорода, кислорода, оксидов азота.

Дифманометр ДСП-3 с унифицированным выходным сигналом состоит из измерительного блока ИБ и пневматического преобразователя ПИП. Измерительный блок имеет плюсовую и минусовую камеры, разделенные основанием 7. В камерах расположены чувствительные элементы — сильфоны 1 и 5 диаметром 20 мм. Сильфоны с одной стороны жестко связаны с основанием, а с другой — с клапанами 2 и 6, снабженными уплотняющими резиновыми кольцами. Внутренняя полость 4 узла сильфонов заполнена кремнийорганической жидкостью. Изменение объема жидкости, вызванное колебаниями температуры, воспринимается компенсационным сильфоном 3. Вывод с рычага 8 из основания уплотнен мембраной 9. Две упругие

ленты удерживают рычаг 8 от осевого перемещения при воздействии на мембрану рабочего давления.

Рычаг 8 при помощи рычага 10 связан с пневмосиловым преобразователем ПИП.

Измеряемый перепад давления ($P_2 - P_1$) воспринимается сильфонами 1 и 5 и преобразуется в пропорциональное усилие, которое при помощи рычагов 11 и 12 пневмосилового преобразователя уравнивается усилием F сильфона обратной связи 17.

При изменении измеряемого перепада давления изменяется усилие N , происходит незначительное перемещение рычажной системы и заслонки 14 индикатора рассогласования 15. Индикатор рассогласования преобразует это перемещение в управляющий сигнал давления сжатого воздуха на выходе усилителя 16.

Выходной сигнал усилителя 16 поступает в линию дистанционной передачи и в сильфон обратной связи 17. Значение выходного сигнала $P_{\text{вых}}$, пропорциональное измеряемому перепаду давления, изменяется винтом настройки 13. В расходомерах переменного перепада давлений применяют механические, электрические и пневматические счетчики.

На рис. 4.16 показана принципиальная схема пневматического интегрирующего прибора типа ПИК-1.

Действие интегрирующего прибора основано на принципе силовой компенсации. Усилие на приемном элементе-сильфоне 1, возникающее от входного пневматического сигнала, непрерывно уравнивается усилием, развиваемым центробежным регулятором 7, установленным на роторе 8. Скорость ро-

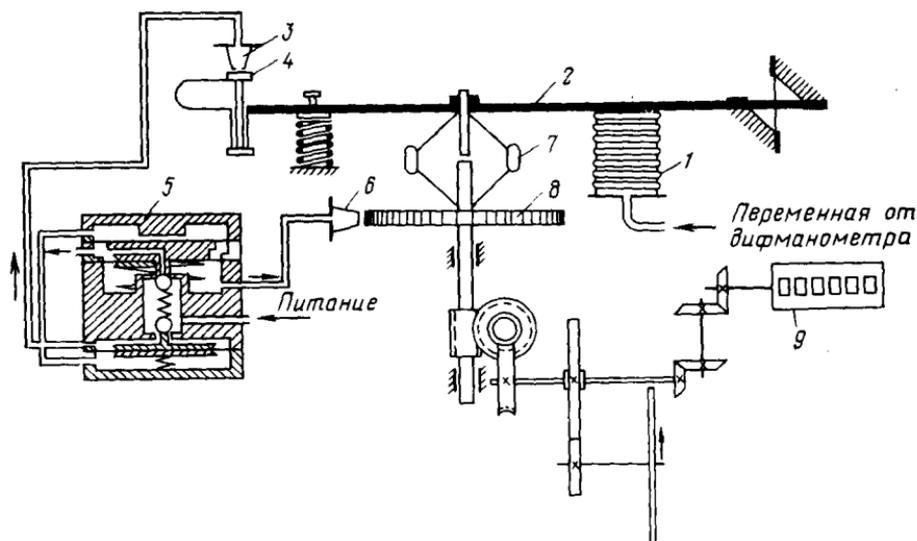


Рис. 4.16. Пневматический интегратор

тора (и центробежного регулятора), приводимого во вращение струей сжатого воздуха, вытекающего из разгонного сопла 6 пневмореле 5, зависит от давления в системе сопло — заслонка (3, 4), зазор которой пропорционален перемещению приемного сильфона. При определенной скорости вращения, соответствующей измеряемому расходу, силы, приложенные к рычагу 2 со стороны сильфона и со стороны центробежного регулятора, уравниваются. Вращение ротора центробежного регулятора передается на ось счетчика 9.

Скорость вращения ротора связана линейной зависимостью с расходом, в то время как сигнал от дифманометра, поступающий на вход интегратора, находится в квадратичной зависимости от расхода. В приборе происходит автоматическое извлечение корня в следующем порядке.

Выходной сигнал P , а следовательно, и сила со стороны приемного сильфона связаны квадратичной зависимостью с расходом Q

$$P = f(Q^2).$$

Центробежная сила, а следовательно, и усилие центробежного регулятора связаны квадратичной зависимостью со скоростью вращения ротора ω

$$N = f(\omega^2). \quad (4.30)$$

Но, как указывалось выше, эти силы при установившемся вращении равны $P=N$; следовательно, расход линейно связан со скоростью вращения ротора

$$Q = f(\omega). \quad (4.31)$$

Показания счетчика при любом максимальном расходе, соответствующем входному давлению 100 кПа, в течение 1 ч изменяются на 120 единиц. Поэтому, чтобы найти истинный расход за любой промежуток времени, необходимо разность показаний счетчика, снятую за этот период времени, умножить на коэффициент, величина и размерность которого должны соответствовать шкале.

Например, чтобы получить максимальный расход при 100%-ной шкале, нужно 120 умножить на 0,833% (постоянная интегратора равна 0,833%. Для шкалы 2500 м³/ч постоянная интегратора равна 20,83 м³ и т. п.

Для более точного снятия показаний в приборе имеется диск точного отсчета 10, один оборот которого соответствует единице счетчика.

Основные правила установки и эксплуатации расходомеров. Заполнение дифманометра уравнивающей жидкостью, его монтаж и подключение к соединительным линиям для измерения перепада давлений на сужающем устройстве следует производить в соответствии с руководством по монтажу и эксплуатации прибора, а также по требованиям Правил РД

50-213—80. Выбор дифманометра по параметрам окружающей среды и его применение для заданных рабочих условий измерения расхода должны соответствовать требованиям технической документации завода-изготовителя.

Допускается подключение к одному сужающему устройству двух и более дифманометров; при применении интегрирующих дифманометров одновременная их работа не допускается. Допускается подключение соединительных линий одного дифманометра к соединительным линиям другого дифманометра и подключение манометра к «плюсовой» импульсной линии дифманометра, если это не оказывает влияния на процесс измерения. Соединительные линии для подключения элементов телемеханики должны быть проложены отдельно от других соединительных линий по кратчайшему расстоянию вертикально или с уклоном к горизонтали не менее 1:10. Длина линий не должна превышать наибольшей допустимой длины, указанной в руководстве по монтажу и эксплуатации дифманометра. Соединительные линии должны быть защищены от действия внешних источников тепла или холода.

При измерении расхода горячего вещества ($t \geq 100^\circ\text{C}$) необходимо обеспечить равенство температур в обеих соединительных линиях. Соединительные линии должны прокладываться таким образом, чтобы исключить в них скопление воздушных пузырьков (при измерении расхода жидкости) и конденсата (при измерении расхода газа или пара). Для этих целей на соединительных линиях рекомендуется устанавливать газосборник или отстойные сосуды. При измерении расхода агрессивных сред передача измеряемого давления должна осуществляться через разделительную жидкость, заливаемую в дифманометр. Жидкость служит для защиты внутренних полостей дифманометров от воздействия измеряемой среды. В этом случае на участках соединительных линий между дифманометром и сужающим устройством подключают разделительные сосуды. Конструкции разделительных сосудов и схемы их установок следует выбирать по ГОСТ 14320—73.

Требования к соединительным линиям для газов. При измерении расхода газа дифманометр рекомендуется устанавливать выше сужающего устройства (рис. 4.17, а). При расположении дифманометра ниже сужающего устройства должны предусматриваться отстойные сосуды в низших точках соединительных линий (рис. 4.17, б).

Для горизонтальных трубопроводов соединительные линии следует подключать к верхней половине сужающего устройства.

Требования к соединительным линиям для водяного пара. При измерении расхода пара должно быть обеспечено постоянство и равенство уровней конденсата в обеих соединительных линиях. Это достигается размещением вблизи сужающего устройства уравнительных конденсационных сосудов, которые

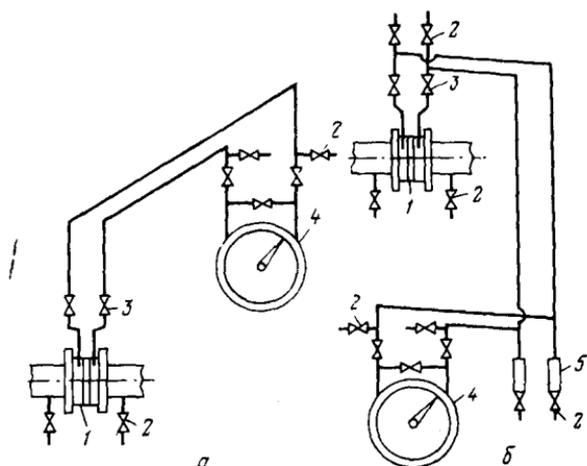


Рис. 4.17. Схемы соединительных линий при измерении расхода газа:

1 — сужающее устройство; 2 — продувочный вентиль; 3 — вентиль; 4 — дифманометр; 5 — отстойный сосуд

вместе с участками соединительных линий между сосудами и дифманометром заполняют конденсатом (водой).

Трубки, соединяющие сужающее устройство с сосудами, на участках вблизи сосудов должны располагаться горизонтально и на одном уровне. Эти трубки должны быть термоизолированы. Типы и основные параметры уравнильных конденсационных сосудов приведены в ГОСТ 14318—73.

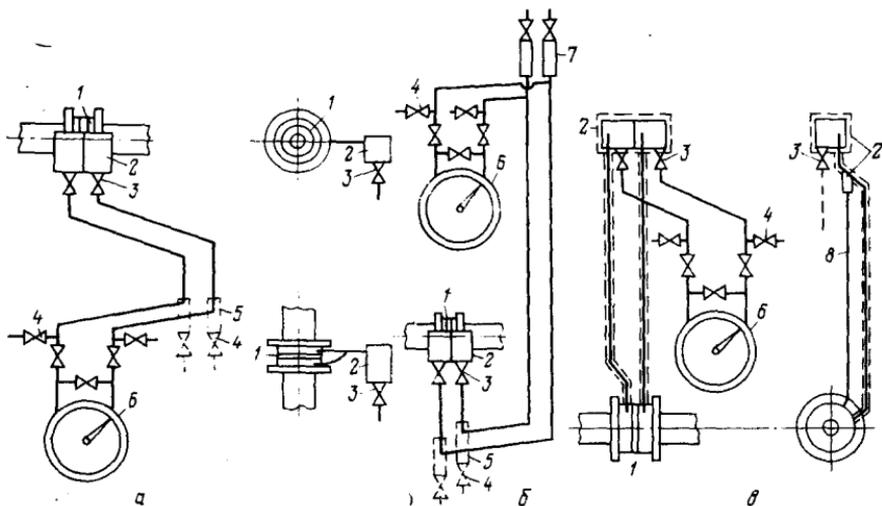
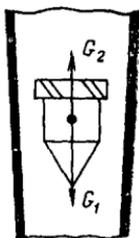


Рис. 4.18. Схемы соединительных линий при измерении расхода пара:

1 — сужающее устройство; 2 — уравнильный сосуд; 3 — вентиль; 4 — продувочные вентили; 5 — отстойный сосуд; 6 — дифманометр; 7 — газосборник; 8 — трубка для слива конденсата; 9 — термоизоляция

Рис. 4.19. Ротаметр



Дифманометр следует располагать ниже сужающего устройства (рис. 4.18. а). При $P > 0,2$ МПа допускается устанавливать дифманометр выше сужающего устройства (рис. 4.18. б). Данная схема применима также при расположении дифманометра ниже сужающего устройства на расстоянии не более 1,5 м. Схема, приведенная на рис. 4.18, в, допустима при $P \leq 0,2$ МПа и расстоянии между трубопроводом и сосудами не более 4 м. При этом трубки, соединяющие сужающее устройство с сосудами, должны иметь внутренний диаметр не менее 25 мм. Указанные трубки, а также сосуды должны быть термоизолированы.

Требования к соединительным линиям для жидкостей. При измерении расхода жидкости дифманометр рекомендуется устанавливать ниже сужающего устройства. Соединительные линии на всем протяжении должны иметь уклон в одну сторону. В случае расположения дифманометра выше сужающего устройства в высших точках линий необходимо помещать газосборники. Для горизонтальных трубопроводов соединительные линии следует подключать к нижней половине сужающего устройства. Перед дифманометром рекомендуется устанавливать отстойные сосуды (на схемах показаны пунктиром). Применение сосудов обязательно, если из измеряемой жидкости выпадают осадки.

При измерении расхода горячих жидкостей в соединительные линии следует включать уравнильные сосуды, обеспечивающие равенство плотностей жидкости в трубах, соединяющих сосуды с прибором. Конструкция и основные параметры уравнильных сосудов для жидкостей приведены в ГОСТ 13219—73.

4.5. РАСХОДОМЕРЫ ПОСТОЯННОГО ПЕРЕПАДА ДАВЛЕНИЙ

Наиболее распространенными приборами этой группы являются расходомеры со свободно перемещающимся в корпусе поплавком (ротаметры). Принципиальная схема ротаметра показана на рис. 4.19. Проходящий через ротаметр снизу поток жидкости или газа поднимает поплавок вверх до тех пор, пока расширяющаяся кольцевая щель между телом поплавка и стенками конусной трубки не достигнет такой величины, при которой действующие на поплавок силы уравновешиваются, и он останавливается на той или иной высоте в зависимости от величины расхода. При неизменном расходе поплавок неподвижен.

В работающем ротаметре поплавок полностью погружен в измеряемую среду. Вес погруженного поплавка G_1 определя-

ется уравнением

$$G_1 = V_{ng} (\rho_n - \rho_c), \quad (4.32)$$

где V_n — объем поплавка; ρ_n и ρ_c — плотности поплавка и измеряемой среды соответственно; g — ускорение свободного падения.

Сила G_2 , действующая на поплавок со стороны измеряемого потока, равна

$$G_2 = (P_1 - P_2) F_0, \quad (4.33)$$

где P_1 и P_2 — давления среды перед поплавком и за ним; F_0 — наибольшее поперечное сечение поплавка.

В состоянии равновесия (поплавок неподвижен) $G_1 = G_2$, т. е.

$$V_{ng} (\rho_n - \rho_c) = (P_1 - P_2) F_0 \quad (4.34)$$

$$\text{или } P_1 - P_2 = V_{ng} (\rho_n - \rho_c) / F_0 \quad (4.35)$$

Из полученного уравнения видно, что независимо от положения поплавка перепад давлений на нем постоянен и не за-

висит от измеряемого расхода. Это объясняется постоянством скорости измеряемой среды при изменении ее расхода, что обусловлено изменением площади кольцевого зазора между поплавком и трубкой. Зависимость положения поплавка от измеряемого расхода линейна. Этим и определяется равномерность шкалы ротаметра.

Ротаметры выполняют со стеклянной или металлической трубкой. На рис. 4.20 показан ротаметр со стеклянной конической трубкой 3, закрепленной в двух металлических головках 1 и 6, снабженных сальниками и фланцами для включения в вертикальный участок трубопровода. Головки стянуты одна с другой несколькими тягами 4, образующими вместе с поперечными 5 защитную решетку

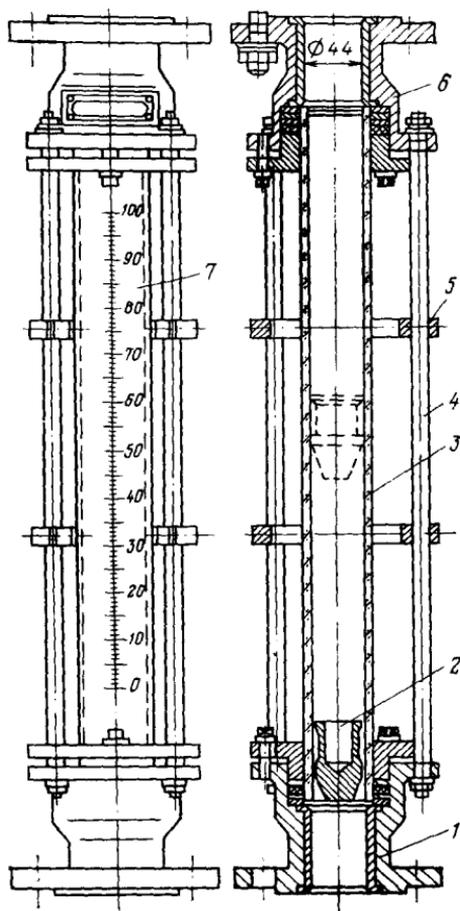


Рис. 4.20. Ротаметр со стеклянной трубкой

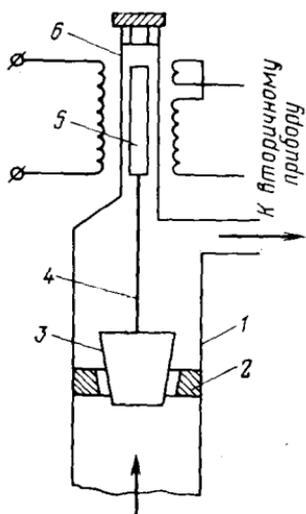


рис. 4.22. Ротаметр с дифференциально-трансформаторным преобразователем

Собственно ротаметр имеет конический поплавок 1, диафрагму 2 и цилиндрическую металлическую трубку 3 из стали X18H9T. Имеются модели ротаметров с поплавком, перемещающимся внутри конусной трубки. На штоке 4 закреплены два цилиндрических постоянных магнита 5, обращенные один к другому одноименными полюсами. Магниты перемещаются вместе с поплавком внутри трубки 6, выполненной из немагнитного материала. Снаружи трубку 6 охватывает вилка, составленная из двух плоских укрепленных на рычаге 8 магнитов 7.

Перемещение поплавка через магнитную муфту, образованную внутренними магнитами 5 и наружными магнитами 7 и рычаг 8 передается стрелке 9, показывающей величину расхода на шкале 23.

Механизм пневматической дистанционной передачи состоит из пневмопреобразователя, работающего по принципу компенсации перемещений, и пневмореле. Ротаметры этого типа изготовляют на рабочее давление 6,4 МПа; основная погрешность не превышает 3% от максимального деления шкалы.

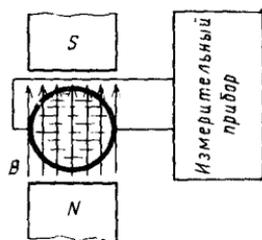
На рис. 4.22 приведена принципиальная схема ротаметра с электрической дифференциально-трансформаторной системой передачи показаний на расстояние. Измерительная часть прибора изготовлена в виде металлического цилиндра 1, в который помещена диафрагма 2. Внутри диафрагмы перемещается конусный поплавок 3, жестко соединенный со штоком 4; на верхнем конце штока укреплен сердечник 5 дифференциально-трансформаторного преобразователя. Сердечник находится внутри разделительной трубки 6, на которую надета катушка преобразователя. Бесшкальные ротаметры работают в комплекте с вторичными дифференциально-трансформаторными приборами.

Ротаметры изготовляют на рабочее давление 6,2 МПа. Основная погрешность комплекта (преобразователя и вторичного прибора) составляет 3% от верхнего предела измерения.

4.6. РАЗНЫЕ РАСХОДОМЕРЫ

Электромагнитные расходомеры. Эти расходомеры подразделяются на приборы с электромагнитным преобразователем расхода и приборы с электромагнитными преобразователями скорости потока.

Рис. 4.23. Электромагнитный расходомер



Приборы с электромагнитным преобразователем расхода основаны на взаимодействии движущейся жидкости с магнитным полем. Это взаимодействие подчиняется закону Фарадея, согласно которому в жидкости, пересекающей магнитное поле, индуцируется э. д. с., пропорциональная скорости движения жидкости.

Принципиальная схема электромагнитного расходомера показана на рис. 4.23. Трубопровод с перемещающейся в нем жидкостью помещен в магнитное поле. Трубопровод изготовляют из изоляционного материала, для этой цели используют фторопласт, эбонит, резину и другие материалы в зависимости от свойств измеряемой жидкости.

Известно, что в движущемся проводнике, пересекающем силовые линии магнитного поля, индуцируется электродвижущая сила, величина которой определяется по формуле

$$E = Blv, \quad (4.36)$$

где E — индуцируемая в проводнике э. д. с.; B — магнитная индукция; l — длина проводника; v — скорость движения проводника.

В случае измерения расхода жидкости можно записать

$$E = Bdv_{\text{ср}}, \quad (4.37)$$

где d — внутренний диаметр трубопровода; $v_{\text{ср}}$ — средняя скорость протекания жидкости через поперечное сечение трубы в зоне индуцируемой э. д. с.

Следовательно, электромагнитный расходомер является по существу генератором, в котором проводником, перемещающимся в магнитное поле, служит электропроводная жидкость. Проводимость жидкости должна быть не ниже от 10^5 до 10^6 См, что соответствует проводимости водопроводной воды.

В стенке трубопровода диаметрально противоположно в одном поперечном сечении введены электроды (заподлицо с внутренним диаметром трубы). К электродам подключают какой-либо высокочувствительный измерительный прибор, шкала которого градуирована в единицах скорости или единицах расхода. Измерительный прибор выбирают с большим входным сопротивлением в соответствии с неравенством

$$z_{\text{вх}} \gg z_{\text{ж}},$$

где $z_{\text{вх}}$ — входное сопротивление измерительного прибора; $z_{\text{ж}}$ — сопротивление жидкости между электродами.

Практически независимость показаний расходомера от плотности, температуры и электропроводности жидкости определяется выбранной величиной отношения $z_{\text{вх}}/z_{\text{ж}}$. Чем больше это отношение, тем выше точность расходомера в большом ин-

тервале измерения температуры, плотности, вязкости и электропроводности жидкости. Расход Q определяется по формуле

$$Q = Fv, \quad (4.38)$$

где F — поперечное сечение трубы.

Подставив в уравнение (4.38) значение v_{cp} из (4.37), получим

$$E = BdQ/F, \quad (4.39)$$

$$\text{или } E = kQ \quad (4.40); \quad k = Bd/F. \quad (4.41)$$

В качестве измерительного прибора можно использовать потенциометры или милливольтметры.

Комплект общепромышленного электромагнитного расходомера (Э.М.Р.) состоит из преобразователя расхода и измерительного блока. Конструктивно преобразователь включает два узла — трубу и электромагнит. Преобразователь содержит также контур для подавления трансформаторной э.д.с.

Электромагнитные расходомеры имеют ряд преимуществ. Прежде всего они практически безынерционны, что очень важно при измерении быстроизменяющихся расходов и при использовании их в системах автоматического регулирования. Результат измерения не зависит от наличия взвешенных частиц в жидкости и пузырьков газа. Показания расходомера не зависят от свойств измеряемой жидкости (вязкости, плотности) и от характера потока (ламинарный, турбулентный).

Вследствие линейной зависимости возникающей э.д.с. от расхода шкала вторичного прибора линейна. Электромагнитные расходомеры обеспечивают измерение расхода в интервале 1–2500 м³/ч и более при трубопроводах с внутренним диаметром от 10 до 300 мм при линейной скорости движения жидкости (v_{cp}) от 0,6 до 10 м/с.

Промышленность выпускает Э.М.Р. с различными электромагнитными полями возбуждения. Расходомеры типов ИР-51, ИР-51А, 4-РИМ, 5-РИМ имеют равномерное магнитное поле возбуждения. Это обеспечивает независимость показаний от профиля распределения скорости при асимметричном потоке. Расходомеры типов «Индукция-51» и «Индукция-М» имеют неоднородное магнитное поле возбуждения. Основная погрешность от верхнего предела измерения по токовому выходному сигналу расходомеров типов ИР-51, ИР-51А, «Индукция-51» (с D_v до 300 мм) равна $\pm 1\%$.

Турбинные расходомеры. Турбинный расходомер — счетчик газа «Тургас» предназначен для измерения объемного расхода и учета объемного количества природного горючего газа (метана). Он основан на принципе вращения натекающим потоком газа измерительной крыльчатки. Угловая скорость крыльчатки преобразуется в электрические импульсные сигналы, частота следования которых пропорциональна объемному расходу.

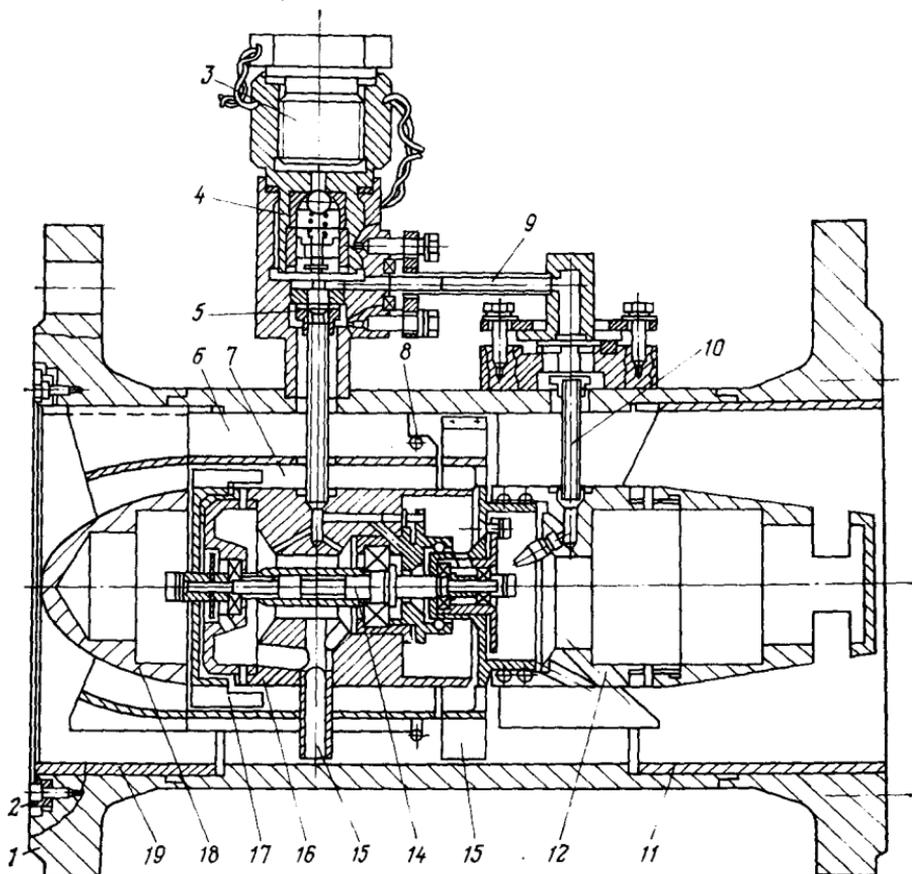


Рис. 4.24. Преобразователь-счетчик «Тургас»

Комплект расходомера счетчика «Тургас» состоит из турбинного преобразователя (датчика) объемного расхода ПРГ и электронного блока измерения.

Ряд приборов включает пять типоразмеров преобразователей по пределам измерения: ПРГ-100, ПРГ-200, ПРГ-400, ПРГ-800 и ПРГ-1600.

Конструкция преобразователя типа ПРГ-400 показана на рис. 4.24.

Преобразователь расхода представляет собой цилиндрический корпус 1 с фланцами, в проточной части которого последовательно по потоку расположены передний направляющий аппарат 18 и опора 16, внутри которой проходит вал 14 с двумя парами подшипников. На каждой паре вращаются измерительная и приводная винтовые крыльчатки 13 и 17. Далее установлен задний направляющий аппарат 12. Втулки 11 и 19 служат для стягивания в осевом направлении узлов и деталей

проточной части ПРГ. Проточная часть разделена на два тракта — основной канал 6, в котором вращается измерительная крыльчатка, и концентрично основному — байпасный 7, в котором расположена приводная крыльчатка.

Система труб 5, 9, 10 вместе с впускным штуцером 4 служит для подачи масла к подшипникам, для этого вместо пробки 3 на период смазки устанавливают масленку. Во входной части корпуса ПРГ находится металлическая сетка 2. Измерительная крыльчатка 13 расположена в зоне магнитондукционного преобразователя (расположен на корпусе ПРГ) и является чувствительным элементом при преобразовании скорости потока газа в электрические импульсы. Приводная крыльчатка 17 расположена в байпасном канале и служит для вращения вала 14, с которым она жестко связана.

На радиально расположенных лопастях опоры 16 перед крыльчаткой 13 установлено кольцо 8, которое выполняет функции элемента, улучшающего при его обтекании газовой средой характеристику прибора, что обусловлено воздействием определенным образом кольца 8 на вращение крыльчатки 13. Трубка 15 служит для сбора и слива излишков масла из зоны подшипников.

Средний ресурс расходомера-счетчика не менее 10 000 ч. Вероятность безотказной работы за 2000 ч составляет 0,95.

Ультразвуковые расходомеры. Эти расходомеры основаны на смещении ультразвуковых колебаний движущейся жидкостью.

В трубопроводе установлены два источника и два приемника ультразвуковых колебаний частотой 1—3 МГц. Если жидкость в трубопроводе неподвижна, то при скорости ультразвука c длительность прохождения импульса равна

$$t = l/c, \quad (4.42)$$

где l — расстояние между излучателями и приемниками ультразвука.

При перемещении жидкости со скоростью v время прохождения ультразвука по направлению потока t_1 и навстречу ему t_2 составит

$$\begin{aligned} t_1 &= l/(c + v); & t_2 &= l/(c - v), \\ \text{откуда} & \Delta t = t_1 - t_2 = 2lv/c^2. \end{aligned} \quad (4.43)$$

Эта разность времен прохождения импульсов по потоку и против потока является мерой расхода.

Приборы данного типа применяют для измерения расхода пульп при малых диаметрах трубопроводов (от 10 мм) и скоростях потоков не менее 0,02 м/с.

КОНТРОЛЬ УРОВНЯ ЖИДКОСТЕЙ И СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ

Измерение уровня жидкостей и сыпучих тел относится к числу вспомогательных контрольных операций, позволяющих определять количества жидкости или сыпучего тела в хранилище для учета продукта и сигнализации о переполнении расходных баков и бункеров. Приборы, предназначенные для этой цели, называются уровнемерами широкого диапазона. Эти приборы имеют шкалу с нулем в начале и делениями, идущими от нуля в одну сторону. Единицы измерения — сантиметры, дециметры и метры.

Кроме того, измерение уровня необходимо для поддержания его на заданной высоте. В этом случае приборы показывают величину отклонения уровня от нормального положения и называются уровнемерами узкого диапазона. Шкала прибора имеет нуль посередине и деления, идущие в обе стороны от нуля. Пределы измерений обычно составляют от ± 100 до ± 150 мм. Единицы измерения в узком диапазоне — сантиметры и миллиметры.

5.1. ИЗМЕРЕНИЕ УРОВНЯ ЖИДКОСТЕЙ

Устройства для измерения уровня жидкостей можно подразделить на следующие: а) визуальные; б) поплавковые, в которых для измерения уровня используется поплавок или другое тело, находящееся на поверхности жидкости; в) гидростатические, основанные на принципе сообщающихся сосудов со средами одинаковой или различной плотности по сравнению с плотностью измеряемой среды; г) электрические, в которых величины электрических параметров зависят от уровня жидкости. д) ультразвуковые, основанные на принципе отражения звуковых волн; е) радиоизотопные, основанные на использовании интенсивности потока ядерных излучений, зависящих от уровня жидкости.

Визуальные уровнемеры. Простейшим измерителем уровня жидкости служат указательные стекла (рис. 5.1).

Работа указательных стекол основана на принципе сообщающихся сосудов. Указательное стекло соединяют с сосудом нижним концом (для открытых сосудов) или обоими концами (для сосудов с избыточным давлением или разрежением). Наблюдают за положением уровня жидкости в стеклянной трубке, можно судить об изменении уровня в сосуде.

Указательные стекла снабжают вентилями или краями для отключения их от сосуда и продувки системы. В арматуру указательных стекол сосудов, работающих под давлением, обычно вводят предохранительные устройства, автоматически закрыва-

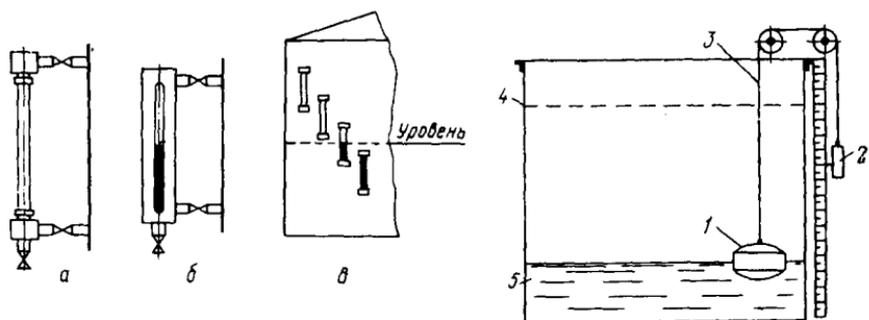


Рис. 5.1. Указательные стекла:

а — проходящего света; *б* — отраженного света; *в* — несколько указательных стекол на высоких резервуарах

Рис. 5.2. Поплавковый уровнемер

ющие каналы в головках при случайной поломке стекла. Плоские указательные стекла рассчитаны на давление до 2,94 МПа и температуру до 300 °С.

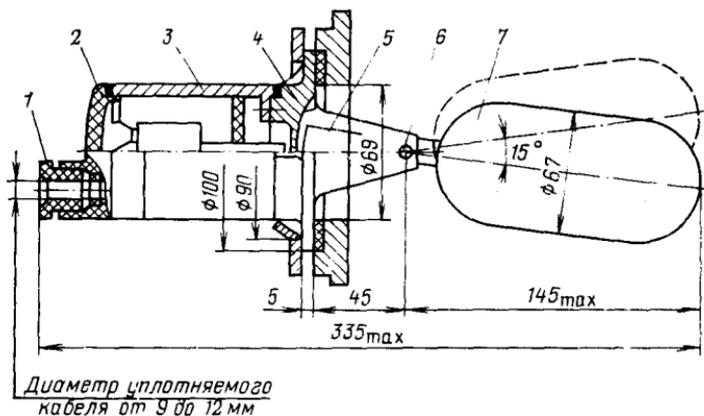
Указательные стекла не рекомендуется употреблять длиной более 0,5 м, поэтому при контроле уровня, изменяющегося больше чем на 0,5 м, устанавливают несколько стекол (рис. 5.1, *в*) так, чтобы верх предыдущего стекла перекрывал низ последующего.

Поплавковые уровнемеры. Чувствительным элементом поплавкового измерителя уровня является поплавок 1, плавающий на поверхности жидкости (рис. 5.2).

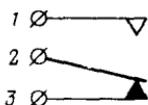
Поплавок уравнивается грузом 2, который связан с поплавком гибким тросом 3. Положение груза относительно шкалы определяет уровень жидкости. Пределы измерения устанавливают в соответствии с принятыми значениями верхнего 4 и нижнего 5 уровней.

Работа поплавкового электрического уровнемера типа ДПЭ (рис. 5.3) основана на изменении положения поплавка, связанного с постоянным магнитом, при изменении уровня жидкости. Магниты, ориентированные одноименными полюсами один относительно другого, обеспечивают при перемещении поплавка управление контактными устройствами через герметичную стенку. При достижении жидкостью верхнего предельного положения нормально-закрытый контакт размыкается, а нормально-открытый замыкается.

Уровнемеры этого типа выпускаются трех модификаций. Первичный преобразователь уровнемера типа ДПЭ-1 состоит из поплавка 7 и магнита 5, закрепленного на оси 6 кронштейна 4, размещенного в литом алюминиевом корпусе 3. На изолированной крышке 2, крепящейся винтами к корпусу датчика, расположен переключатель. В крышке предусмотрено сальниковое уплотнение 1 для закрепления кабеля.



Электрическая схема контактов



Положение контактов в отсутствие жидкости

Рис. 5.3. Поплавковый электрический уровнемер типа ДПЭ-1

Уровнемеры ДПЭ имеют погрешность срабатывания ± 3 мм. Основным эксплуатационным недостатком поплавков — возможность коррозии и протравления тонких стенок поплавка, приводящих к его потоплению. Это ограничивает область применения поплавковых измерителей уровня.

Значительно более надежны тонущие поплавки — массивные буйки 1 (рис. 5.4). При изменении уровня жидкости изменяется по закону Архимеда действующая на конец рычага 2 сила (вес буйка) и соответственно изменяется момент сил, действующих на рычаг. Изменяющийся при колебаниях уровня момент сил от буйки 1 передается через вал 5, закрепленный в доньшке 6, на трубку 4 и уравнивается моментом ее скручивания. Изменение угла скручивания трубки, пропорциональное величине уровня, очень невелико. Поэтому обычно используют усилители 2, чаще пневматические, соединяемые с доньш-

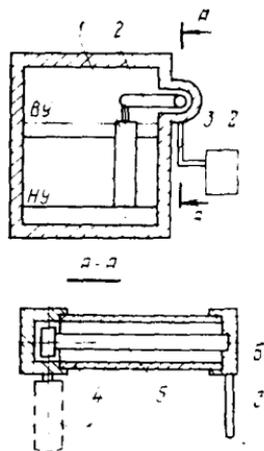


Рис. 5.4. Тонущий поплавок-буйек

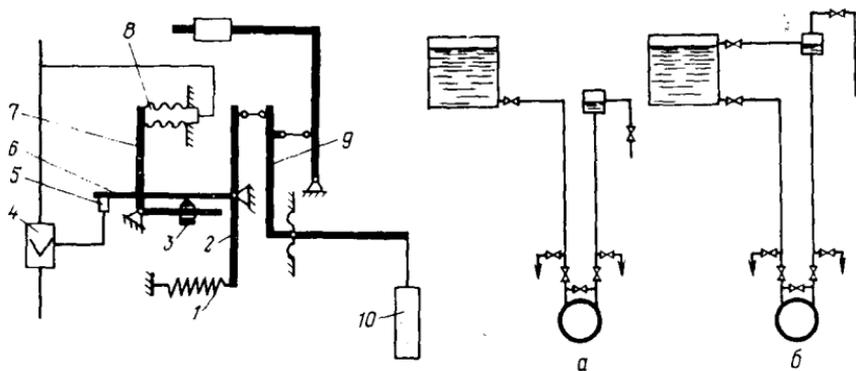


Рис. 5.5. Уровнемер буйкового типа УБ-П:

1 — пружина корректора нуля; 2 — Т-образный рычаг; 3 — подвижная опора; 4 — пневморе-
 реле; 5 — сопло; 6 — заслонка; 7 — Г-образный рычаг; 8 — сифон обратной связи; 9 —
 рычаг; 10 — чувствительный элемент

Рис. 5.6. Схема трубных соединений с размещением дифманометра ниже дна резервуара:

а — при измерении уровня жидкости в открытом резервуаре; б — то же, в резервуаре,
 находящемся под давлением

ком б рычагом 3. Длина буйка 1 зависит от установленных значений верхнего ВУ и нижнего НУ уровней.

Принципиальная схема уровнемера буйкового пневматического типа УБ-П показана на рис. 5.5. Уровнемер предназначен для непрерывного преобразования уровня жидкости, находящейся под атмосферным, вакуумметрическим или избыточным давлением, в пневматический сигнал дистанционной передачи. Он состоит из унифицированного пневмосилового преобразователя и измерительного блока.

Измерительный блок датчика представляет собой рычажную систему с чувствительным элементом в виде буйка 10. Буйек подвешен к рычагу 9 вывода через призму. Вывод рычага 9 из полости рабочего давления уплотнен одной гофрированной металлической мембраной. Начальный вес буйка уравнивается специальным грузом, навинченным на плече дополнительного рычага. Основание имеет фланец, который служит для крепления датчика к объекту. Буйковые измерители уровня используют чаще всего как устройства информации в системах автоматического регулирования, защиты и сигнализации.

Интервал измерения уровня поплавковых и буйковых уровнемеров выбирают из ряда: от 0 до 0,25; 0,4; 0,6; 1,0; 1,6; 2,5; 4,0; 6,0; 10,0; 16,0 и 20 м. Класс точности может быть 0,6; 1,0; 1,6 и 2,5. Для учетно-расчетных операций уровнемеры изготовляют с основными погрешностями от $\pm 1,0$ до 10,0 мм (ГОСТ 13702—78).

Гидростатические уровнемеры. К простейшим гидростатическим измерителям уровня жидкости относятся дифференциаль-

ные манометры. Дифманометром можно измерять уровень в открытых и закрытых сосудах, т. е. в сосудах, находящихся под давлением и разрежением. На рис. 5.6 показана схема трубных соединений при измерении уровня в открытом резервуаре и установка дифманометра ниже его дна.

При применении дифманометров для измерения уровня обязательно устанавливают уравнительный сосуд, наполненный до определенного уровня той же жидкостью, что находится в резервуаре. Назначение уравнительного сосуда — обеспечение постоянного столба жидкости в одном из колен дифманометра. Высота столба жидкости во втором колене дифманометра изменяется с изменением уровня в резервуаре. Каждому значению уровня в резервуаре соответствует определенный перепад давления, показываемый дифманометром, что позволяет судить о положении уровня.

Пьезометрические уровнемеры. Они основаны на принципе гидравлического затвора.

Для измерения уровня (рис. 5.7) используют воздух или инертный газ под давлением, который продувают через слой жидкости. Количество продуваемого воздуха ограничивают диафрагмой D или иным способом так, чтобы скорость движения его в трубопроводе была минимально возможной. Это приближает к нулю потери на трение в трубопроводе после диафрагмы D .

Уровень жидкости определяется по установившемуся давлению $(P - P_x)$ в системе

$$P - P_x = H(\rho_{жг}),$$

откуда $H = \frac{P - P_x}{\rho_{жг}}.$ (5.1)

Давление $(P - P_x)$ определяется по высоте h столба жидкостного манометра с замыкающей жидкостью плотностью $\rho_{ж}$ или любым иным способом. В случае измерения уровня в сосудах, заполненных агрессивными жидкостями и газами (рис. 5.7, б) обязателен непрерывный подвод воздуха или инертного газа в обе линии, подсоединяемые к дифференциальному манометру. Для наблюдения за непрерывностью на каждой линии

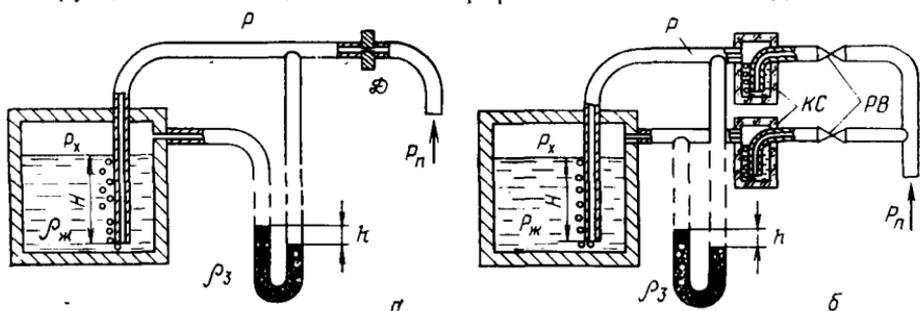


Рис. 5.7. Схема пьезометрического измерения уровня:

а — неагрессивной жидкости под давлением; б — агрессивной жидкости под давлением

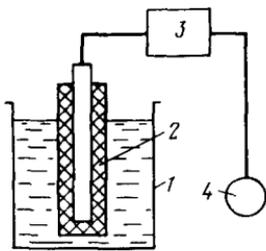


Рис. 5.8. Схема измерения емкостными уровнемерами

устанавливают стеклянные контрольные сосуды *КС* с водяным затвором, по которому видно движение воздуха, или ротаметры. Количество подводимого воздуха устанавливают регулирующими вентилями *РВ*.

Пьезометрические уровнемеры находят широкое применение для измерения уровня в подземных резервуарах.

Электрические уровнемеры. В электрических уровнемерах уровень жидкости преобразуется в электрический сигнал. Наиболее распространены емкостные и омические уровнемеры.

Работа емкостных уровнемеров основана на том, что диэлектрическая проницаемость водных растворов солей, кислот и щелочей отличается от диэлектрической проницаемости воздуха либо водных паров.

Принципиальная схема емкостного уровнемера показана на рис. 5.8. В сосуд с жидкостью 1, уровень которой необходимо измерить, опущен электрод 2, покрытый изоляционным материалом. Электрод вместе со стенками сосуда образует цилиндрический конденсатор, емкость которого изменяется при колебаниях уровня жидкости. Величина емкости измеряется электронным блоком 3, который дает сигнал в блок 4, представляющий собой релейный элемент (в схемах сигнализации достижения определенного уровня) или указывающий прибор (в схемах измерения уровня).

Принцип действия омических сигнализаторов основан на замыкании электрической цепи источника питания через кон-

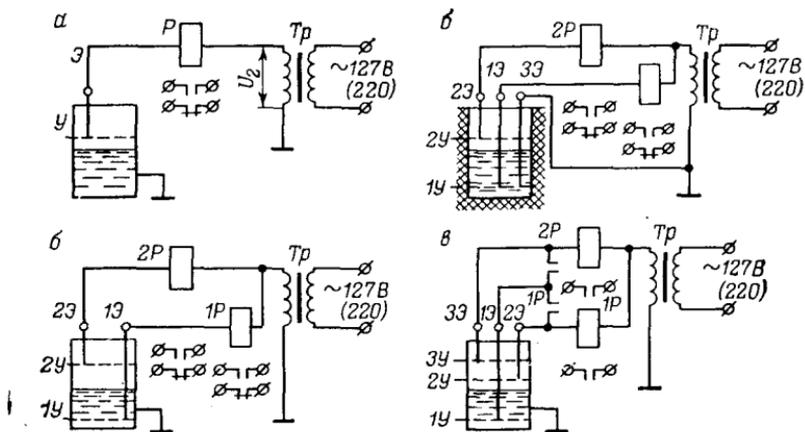


Рис. 5.9. Схемы включения омического релейного сигнализатора уровня: а — для контроля одного уровня; б — для контроля двух уровней; в — для контроля двух уровней в емкости из изоляционного материала; г — для контроля трех уровней

Рис. 5.10. Схема радиоизотопного уровнемера со следящей системой

контролируемую среду, представляющую собой участок электрической цепи, обладающей определенным омическим сопротивлением (растворы кислот и щелочей). Практически омические сигнализаторы уровня могут быть применены для сред с проводимостью от $2 \cdot 10^{-3}$ См и выше.

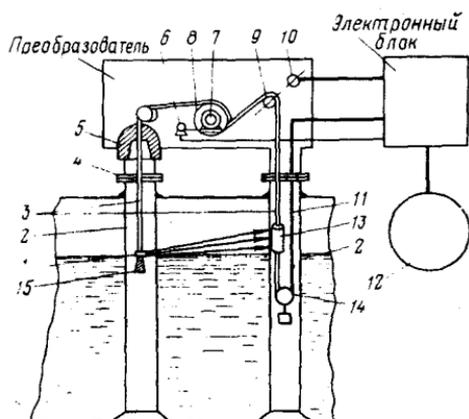
Прибор представляет собой электромагнитное реле, которое включается в цепь, образующуюся между электродом и контролируемым материалом. Схемы включения релейного сигнализатора уровня (рис. 5.9) могут быть различны в зависимости от типа объекта и числа контролируемых уровней.

Радиоизотопные уровнемеры. Уровнемеры с радиоизотопными излучателями делятся на две группы: 1) со следящей системой, для непрерывного измерения уровня, и 2) сигнализаторы (индикаторы) отклонения уровня от заданного значения.

Принципиальная схема следящего уровнемера типа УР приведена на рис. 5.10. Действие прибора основано на сравнении интенсивностей потоков γ -лучей, проходящих выше или ниже уровня раздела двух сред разной плотности. Комплект прибора состоит из трех блоков: 1) преобразователя, содержащего источник и приемник излучения; 2) электронного блока и 3) показывающего прибора.

Преобразователь на фланцах 4 присоединен к вертикальным трубкам 2, установленным внутри объекта измерения. Расположенный в герметичном корпусе преобразователя реверсивный двигатель 6 через червячную передачу 7 вращает барабан 8, на котором укреплена стальная лента 3. На концах ленты свободно висят источник излучения 1 и приемник излучения 13. Электрический сигнал от приемника излучения через гибкий кабель 11 передается на электронный блок. При перемещении приемника кабель фиксируется в определенном положении при помощи ролика 14 с грузом. Лента 3 проходит через зубчатый ролик 9, на оси которого расположен первичный сельсин 10.

Вторичный сельсин находится в показывающем приборе. Ось вторичного сельсина через редуктор связана со стрелками показывающего прибора 12, который имеет две шкалы, градуированные в метрах и сантиметрах. В показывающем прибо-



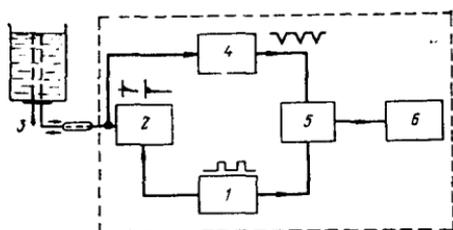


Рис. 5.11. Блок-схема ультразвукового уровнемера

уровня, в стандартный пневматический сигнал. Стандартная индукционная катушка служит для связи с вторичными приборами дифференциально-трансформаторной системы.

Для обеспечения радиационной защиты персонала при транспортировке, монтаже и ремонтных работах внутри объекта измерения источник излучения перемещается автоматически в свинцовый контейнер 5. Отверстие в контейнере при этом закрывается свинцовой пробкой 15, жестко связанной с источником. Диапазон измерения уровня прибором до 10 м, основная погрешность измерения не превышает 1 см.

Использование приборов с радиоизотопными излучателями целесообразно там, где другие методы измерения непригодны.

Ультразвуковые уровнемеры. Ультразвуковые уровнемеры позволяют измерять уровень в отсутствие контакта с измеряемой средой и в труднодоступных местах. В ультразвуковых уровнемерах обычно используется принцип отражения звуковых волн от границы раздела жидкость — газ (воздух).

На рис. 5.11 показана блок-схема ультразвукового уровнемера, работающего на отражении звука от границы сред. Прибор состоит из электронного блока, пьезоэлектрического излучателя (преобразователя) и вторичного прибора (автоматического потенциометра).

Электронный блок ЭБ состоит из генератора 1, задающего частоту повторения импульсов, генератора импульсов 2, посылаемых в измеряемую среду, приемного усилителя 4 и измерителя времени 5. Генератор 1 управляет работой генератора 2 и схемой измерения времени. Частота импульсов 300 Гц. Генератор 2 формирует короткие импульсы для возбуждения пьезоэлектрического излучателя 3. Электрический импульс, преобразованный в ультразвуковой в пьезоэлектрическом излучателе, распространяется в жидкой среде, отражается от границы раздела жидкость — воздух, возвращается обратно, воздействуя спустя некоторое время на тот же излучатель, и преобразуется в электрический. Оба импульса, посланный и отраженный, разделенные во времени, поступают на усилитель.

Время τ между моментом посылки импульса и моментом поступления отраженного импульса является функцией высоты измеряемого уровня, т. е.

$$\tau = 2H/c, \quad (5.2)$$

где H — высота измеряемого уровня; c — скорость распространения ультразву-

ка в измеряемой среде; при любой температуре воды скорость распространения ультразвука $c = 1557 - 0,0245(74 - t^\circ)^2$.

Постоянное напряжение, пропорциональное времени запаздывания отраженного сигнала (уровню), получаемое в измерителе времени, подается на вторичный прибор 6.

5.2. ИЗМЕРЕНИЕ УРОВНЯ СЫПУЧИХ ТЕЛ

Измерение уровня сыпучих тел имеет свои особенности. Характерным отличием сыпучих тел от жидких является непропорциональность передачи давления на дно и стенки в зависимости от уровня.

На рис. 5.12 показан указатель уровня с металлической мембраной. Он состоит из металлической мембраны 1 с закрепленным по центру штоком 2. При прогибе мембраны шток воздействует на контактное устройство 3. На кронштейне 4 закреплена возвратная пружина 5. Для регулирования натяжения возвратной пружины служит винт 6. Изолятор 7 крепится в корпусе сигнализатора 8. При понижении уровня возвратная пружина 5 возвращает мембрану и контактное устройство в исходное положение.

Свойство сыпучих материалов образовывать при насыпании угол естественного откоса позволило создать серию маятниковых приборов, работающих на принципе отклонения материалом чувствительного элемента, выполняемого в виде маятника, с жесткой или гибкой подвеской. На рис. 5.13 показан указатель предельного уровня сыпучего материала. При повышении в бункере 1 уровня сыпучего материала 2 с углом естественного откоса чувствительный элемент 3 отклоняется от вертикального положения и замыкает контактную систему 4 включения световой сигнализации 5. Общим недостатком всех указателей уровня маятникового типа является их зависимость от способа загрузки сосуда (бункера) материалом. Например, при беспорядочной загрузке, когда материал может обтекать маятник со всех сторон, может не произойти ожидаемого отклонения маятника.

Принципиальная схема лотового уровнемера показана на рис. 5.14. В этих уровнемерах зонд 6 и груз 8 подвешены на блоке храпового колеса 4.

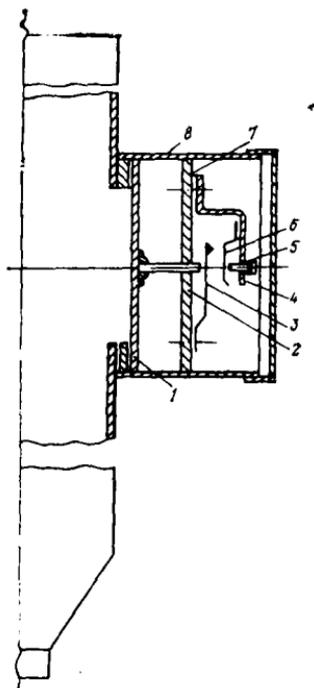
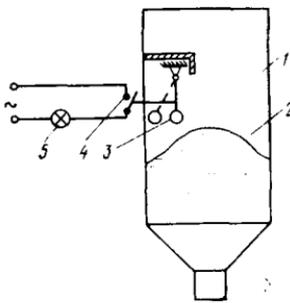


Рис. 5.12. Указатель уровня с металлической мембраной

Рис. 5.13. Указатель уровня маятников типа



Периодически зонд приподнимается при помощи пневматического мембранного привода 2. Привод воздействует на храповое колесо через собачку 3. Зонд опускается на поверхность сыпучего материала 7 под действием силы тяжести.

Если уровень не изменяется, то зонд поднимается и опускается на одно и то же расстояние. При понижении уровня материала зонд опускается на большее расстояние, чем поднимается, и наоборот. При этом храповое колесо с осью 5 в одном направлении поворачивается на больший угол, чем при повороте в обратном направлении. Ось 5 через муфту 10 и поводок 11 соединена с пневмопреобразователем 12. Устройство прибора рассчитано так, что при изменении уровня в заданных пределах давление сжатого воздуха на выходе прибора изменяется от 20 до 100 кПа. Сжатый воздух с выхода пневмопреобразователя 12 подается на вторичный прибор (манометр) 9, шкала которого отградуирована в единицах высоты уровня. Рассмотренный уровнемер позволяет измерять уровень до 20 м с погрешностью ± 10 см.

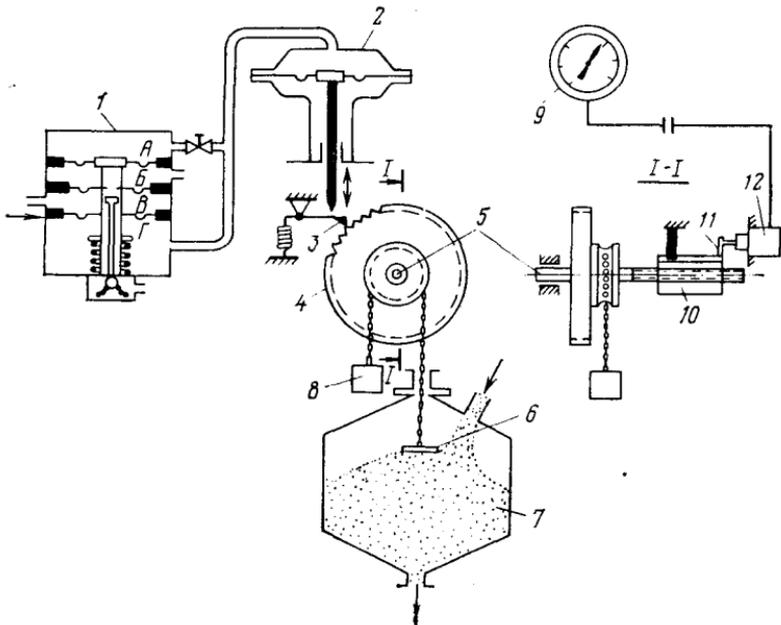
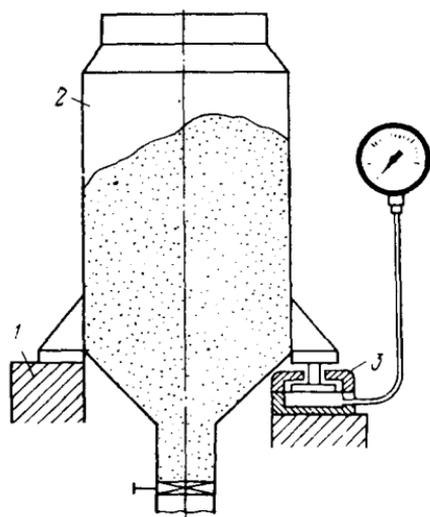


Рис. 5.14. Принципиальная схема лотового уровнемера

Рис. 5.15. Весовой измеритель уровня:
1 — опора; 2 — бункер; 3 — поршень



В качестве первичного преобразователя уровнемера, работающего на весовом принципе (рис. 5.15), можно использовать месдозу. Месдоза представляет собой металлический кожух с закрепленной в нем мембраной. Нижняя часть месдозы заполнена жидкостью, сообщающейся с манометром через импульсную трубку. При изменении веса материала в бункере изменяется давление в системе месдозы — манометр. Недостатком данного принципа измерения является необходимость в некотором перемещении опоры бункера (от 1 до 3 мм). Погрешность измерения достигает $\pm 10\%$.

ГЛАВА 6

КОНТРОЛЬ ТЕМПЕРАТУРЫ

6.1. КЛАССИФИКАЦИЯ ПРИБОРОВ КОНТРОЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

Температура является одним из важнейших параметров химико-технологических процессов.

По современным представлениям температура — это условная статистическая величина, прямо пропорциональная средней кинетической энергии частиц вещества (молекул или атомов). Практически температуру можно измерять лишь методом сравнения нагретости двух тел, причем степень нагретости одного из тел предполагается известной. Для сравнения степени нагретости тел используют изменение какого-либо физического их свойства, зависящего от температуры и легко поддающегося измерению. Установление единицы измерения температуры связано с установлением температурной шкалы. Допускается применение двух температурных шкал: абсолютной термодинамической в градусах Кельвина (К) и международной практической в градусах Цельсия ($^{\circ}\text{C}$) в зависимости от начала отсчета (положение нуля) по шкале. Абсолютную температуру обозначают буквой T , а температуру по шкале Цельсия /

$$T = (t + T_0); \quad t = T - T_0,$$

где $T_0 = 273,15$ К. Например, если температура, измеряемая в градусах Цельсия, равна 70°C , то по абсолютной термодинамической температурной шкале она равна

$$T = 70 + 273,15 = 343,15 \text{ К.}$$

Международная практическая температурная шкала (МПТШ—68), принятая в 1968 г. и введенная как обязательная с 1 января 1971 г., является практическим осуществлением абсолютной термодинамической температурной шкалы. Она выбрана так, чтобы температура, измеренная по этой шкале, была близка к термодинамической температуре и разность между ними оставалась в пределах современной точности измерений. МПТШ—68 основывается на системе постоянных, точно воспроизводимых температурах равновесия (постоянных точек), которым присвоены числовые значения.

Определяющие постоянные точки МПТШ—68 приведены в табл. 6.1.

Классификация приборов для измерения температуры. В зависимости от принципа действия приборы для измерения температуры по ГОСТ 13417—76 подразделяются на следующие группы:

Таблица 6.1. Определяющие постоянные точки МПТШ-68

Состояние равновесия	Присвоенное значение международной практической температуры	
	$T_{\text{ев.}}$ К	$t_{\text{ев.}}$ $^\circ\text{C}$
Равновесие между твердой, жидкой и газообразной фазами равновесного водорода (тройная точка равновесного водорода)	13,81	—259,34
Равновесие между жидкой и газообразной фазами равновесного водорода при давлении 33330,6 Па (25/76 нормальной атмосферы)	17,042	—256,108
Равновесие между жидкой и газообразной фазами равновесного водорода (точка кипения равновесного водорода)	20,28	—252,87
Равновесие между жидкой и газообразной фазами неона (точка кипения неона)	27,102	—246,048
Равновесие между твердой, жидкой и газообразной фазами кислорода (тройная точка кислорода)	54,361	—218,789
Равновесие между жидкой и газообразной фазами кислорода (точка кипения кислорода)	90,188	—182,962
Равновесие между твердой, жидкой и газообразной фазами воды (тройная точка воды)	273,16	0,01
Равновесие между жидкой и парообразной фазами воды (точка кипения воды)	373,15	100
Равновесие между твердой и жидкой фазами цинка (точка затвердевания цинка)	692,73	419,58
Равновесие между твердой и жидкой фазами серебра (точка затвердевания серебра)	1 235,08	961,93
Равновесие между твердой и жидкой фазами золота (точка затвердевания золота)	1 337,58	1 064,43

Манометрические термометры основаны на изменении давления рабочего вещества при постоянном объеме с изменением температуры.

Термоэлектрические термометры включают термоэлектрический преобразователь (ТЭП), действие которого основано на использовании зависимости термоэлектродвижущей силы от температуры.

Термометры сопротивления содержат термопреобразователь сопротивления, действие которого основано на использовании зависимости электрического сопротивления чувствительного элемента (проводника или полупроводника) от температуры.

Пирометры излучения, из них наиболее распространены: квазимонохроматический пирометр, действие которого основано на использовании зависимости температуры от спектральной энергетической яркости, описываемой для абсолютно черного тела с достаточным приближением уравнениями Планка и Вина;

пирометры спектрального отношения, действие которых основано на зависимости от температуры тела отношений энергетических яркостей в двух или нескольких спектральных интервалах;

пирометры полного излучения, действие которых основано на использовании зависимости температуры от интегральной энергетической яркости излучения.

6.2. ТЕРМОМЕТРЫ РАСШИРЕНИЯ И МАНОМЕТРИЧЕСКИЕ ТЕРМОМЕТРЫ

Термометры расширения. Это такие приборы, в которых используется наблюдаемое при изменении температуры изменение объема или линейных размеров тел. В зависимости от вида термометрических веществ термометры расширения подразделяются на жидкостные и термометры, основанные на расширении твердых тел.

Измерение температуры жидкостными стеклянными термометрами основано на различии коэффициентов объемного расширения жидкости и материала оболочки термометра. Показания жидкостного термометра принято характеризовать коэффициентом расширения жидкости в стекле, определяемым уравнением

$$\beta_{t_1, t_2} = \beta'_{t_1, t_2} - \beta''_{t_1, t_2}, \quad (6.1)$$

где β'_{t_1, t_2} — температурный коэффициент расширения жидкости в интервале температур $t_1 - t_2$; β''_{t_1, t_2} — температурный коэффициент расширения стекла в том же интервале температур.

Для изготовления термометров применяют стекла специальных сортов (термометрические), обладающие малым значением коэффициента β_{t_1}'' .

В зависимости от интервала измеряемых температур в качестве рабочей жидкости в жидкостных термометрах применяют пентан (от -190 до 20°C), петролейный эфир (от -130 до 25°C), этиловый спирт (от -100 до 75°C), толуол (от -90 до 100°C) и ртуть (от -30 до 700°C).

Наибольшее распространение получили ртутные стеклянные термометры. Коэффициент расширения ртути мало изменяется при изменении температуры, поэтому шкала ртутного термометра до 200°C практически линейна. Термометры с органическими жидкостями из-за ряда недостатков применяют только для измерения низких температур. Из всех таких термометров наибольшее распространение получили спиртовые.

Несмотря на большое разнообразие конструкций, все жидкостные стеклянные термометры относятся к одному из двух основных типов: палочные (рис. 6.1) и со вложенной шкалой (рис. 6.2).

Палочные термометры имеют толстостенный капилляр наружным диаметром 6—8 мм, нижний конец которого образует

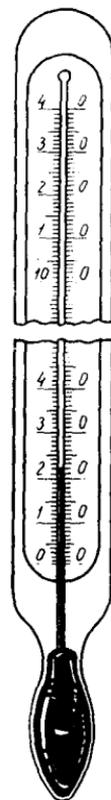


Рис. 6.1. Палочный термометр расширения

Рис. 6.2. Термометр расширения с вложенной шкалой

Рис. 6.3. Контактные термометры:

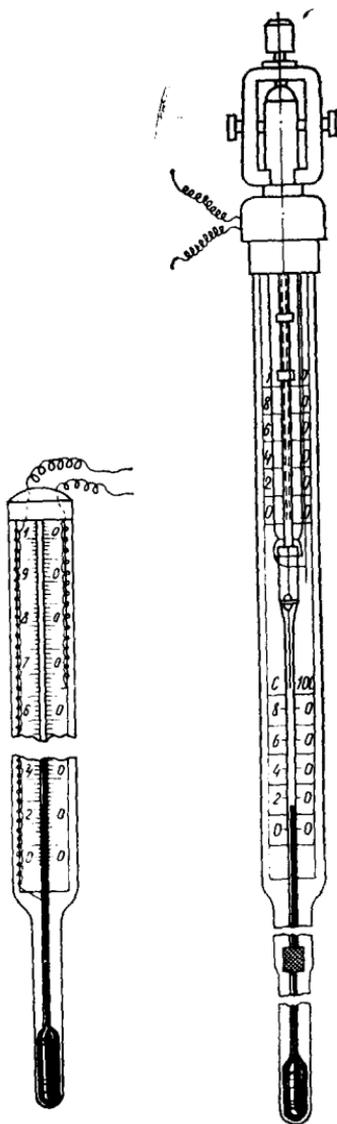
a — одноконтактный ртутный термометр; 1 — нижняя часть термометра; 2 — проводники, соединенные с контактами; *b* — термосигнализатор с магнитной перестановкой контакта

резервуар для жидкости. Шкалу наносят на внешнюю поверхность капилляра. Термометры со вложенной шкалой имеют тонкостенный капилляр с расширенным резервуаром для ртути. Шкалу наносят на пластинку из молочного стекла, которая вместе с капилляром заключена в стеклянную оболочку, прикрепленную к резервуару термометра.

В зависимости от назначения ртутные стеклянные термометры подразделяются на образцовые (1-го и 2-го разрядов), лабораторные и технические. Образцовые термометры 1-го разряда изготовляют только палочного типа, а образцовые 2-го разряда и лабораторные — палочного типа или со вложенной шкалой. Технические термометры изготовляют только со вложенной шкалой. Технические и лабораторные термометры могут иметь шкалы с различными пределами.

Разновидностью ртутных являются контактные термометры, используемые в основном для сигнализации о нарушении заданного температурного режима. На рис. 6.3, *a* показан одноконтактный термометр с контактами из платиновой проволоки, впаянными в нижнюю часть капилляра на уровне отметки, соответствующей той температуре, о которой нужно сигнализировать или которую необходимо поддерживать постоянной. К контактам припаяны проводники из медной проволоки, которые через соответствующие реле включены в цепь электрического нагревателя или сигнализации. В тот момент, когда оба контакта соединяются столбиком ртути, происходит замыкание электрической цепи реле, которое выключает электрический нагреватель или включают сигнализацию.

Контактные термометры бывают с двумя и тремя контактами, с переменным положением верхнего контакта и т. д.



Если термометр, градуированный при полном погружении в среду по условиям эксплуатации не может быть полностью погружен в измеряемую среду, то резервуар его и жидкостный столбик будут находиться при разных температурах. Поправку на выступающий столбик вычисляют по формуле

$$\Delta t = n\beta_{t_1, t_2}(t_2 - t_1), \quad (6.2)$$

где n — число градусов на выступающем столбике; β_{t_1, t_2} — коэффициент расширения жидкости в стекле (для ртути 0,00016, для спирта 0,001); t_2 — температура, показываемая термометром; t_1 — средняя температура выступающего столбика, измеряемая вспомогательным термометром, резервуар которого прикреплен к середине выступающего столбика основного термометра.

Если температура выступающего столбика ниже измеряемой, то поправка Δt имеет положительный знак, а если выше — отрицательный. Ошибки, вызванные выступающим столбиком, могут достигать значительной величины, и пренебрегать ими не следует.

Ртутные стеклянные термометры широко применяют в лабораторной и производственной практике.

Биметаллические термометры. Чувствительным элементом таких термометров является биметаллическая пластинка. Обычно внутренний слой этой пластинки изготовляют из металла, имеющего большой коэффициент линейного расширения, а наружный из металла с малым коэффициентом (из инвара). При повышении температуры пластинка разгибается. Деформация пластинки через тягу, зубчатый механизм и шестеренку передается стрелке. Верхний предел измерения этих термометров ограничивается пределом упругости материалов. Основная область их применения — автоматическое регулирование температуры и сигнализация предельных значений температуры.

Биметаллические элементы применяют также для защиты электрических цепей от перегрузок. В этом случае биметаллическая пластинка при повышении тока нагрузки сверх допустимого значения деформируется и разрывает электрическую цепь пускателя, отключающего нагрузку.

Манометрические термометры. Действие манометрических термометров основано на изменении давления рабочего вещества, заключенного в емкость постоянного объема, при изменении его температуры (рис. 6.4).

Прибор состоит из термобаллона 1, капиллярной трубки 2 и манометрической части 3—6.

Всю систему прибора (термобаллон, капилляр, манометрическая пружина) заполняют рабочим веществом. Термобаллон помещают в зону измерения температуры. При нагревании термобаллона давление рабочего вещества внутри замкнутой системы увеличивается. Увеличение давления воспринимается манометрической пружиной, которая воздействует через передаточный механизм на стрелку или перо прибора.

Манометрическая пружина выполняется как в виде одной или многоступенчатой пружины, так и в виде сильфона (как у

Рис. 6.4. Манометрический термометр с трубчатой пружиной:

1 — термобаллон; 2 — капиллярная трубка; 3 — трубчатая пружина; 4 — держатель; 5 — поводок; 6 — сектор

рассмотренных выше манометров). Длина и диаметр термобаллона могут быть различными. Термобаллоны обычно изготавливают из стали или латуни, обладающей высокой теплопроводностью, а капилляр — из медной или стальной трубки с внутренним диаметром от 0,15 до 0,5 мм. Длина капилляра может быть различной (от 0,25 см до 60 м). Для защиты от механических повреждений капилляр часто помещают в защитную оболочку из оцинкованного стального провода.

Манометрические термометры широко применяют в химических производствах. Этими приборами можно измерять температуру в интервале от -120 до 600°C .

Различают манометрические термометры следующих типов:

газовые, вся система которых заполнена газом под некоторым начальным давлением. В качестве заполнителя термосистем в газовых манометрических термометрах применяют азот, аргон, гелий;

жидкостные, система которых заполнена жидкостью; в качестве заполнителя используют полиметилсилоксановые жидкости;

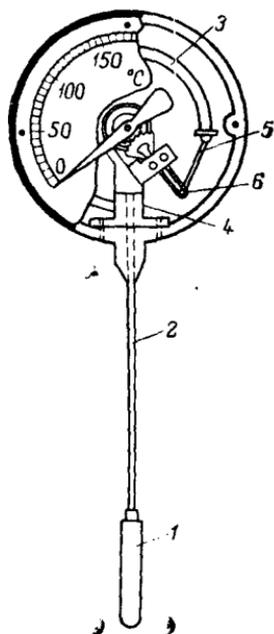
конденсационные, в которых термобаллон частично заполнен низкокипящей жидкостью, а остальное его пространство заполнено парами этой жидкости. В конденсационных манометрических термометрах термосистемы заполняют ацетоном, метилом хлористым, фреоном.

Устройство манометрических термометров всех типов аналогично. Они бывают показывающими, самопишущими и контактными. Основная погрешность манометрических термометров всех видов равна $\pm 1,5\%$ от максимального значения шкалы при нормальных условиях. При отклонении условий от нормальных возникают дополнительные погрешности, которые рассчитывают или компенсируют.

Работа газового манометрического термометра основана на законе Шарля, устанавливающего прямую зависимость между давлением и температурой идеального газа

$$P_t = P_0 [1 + \beta (t - t_0)], \quad (6.3)$$

где $\beta = 1/273,15$ — термический коэффициент расширения газа, $1/^\circ\text{C}$; t — конечная температура, $^\circ\text{C}$; t_0 — начальная температура, $^\circ\text{C}$.



Шкала термометра получается равномерной, что является его преимуществом. Отклонение температуры окружающей среды от $+20^{\circ}\text{C}$ вызывает погрешность измерения, которую можно рассчитать по приближенной формуле

$$\Delta t_m = (V_m/V_0) (t_m - t_0), \quad (6.4)$$

где V_m — объем манометрической пружины; V_0 — объем термобаллона; t_m — температура среды, окружающей манометр, $^{\circ}\text{C}$; t_0 — температура градуировки прибора (20°C).

Погрешность от нагревания капиллярной трубки

$$\Delta t_k = (V_k/V_0) (t_k - t_0), \quad (6.5)$$

где V_k — объем капиллярной трубки; t_k — температура среды, окружающей капилляр, $^{\circ}\text{C}$.

Из формулы (6.5) видно, что погрешность возрастает пропорционально объему, а следовательно, и длине капилляра. Ее можно уменьшить, увеличив объем термобаллона при той же длине капилляра. Обычно объем термобаллона составляет 90% общего объема термометра. При правильно выбранном соотношении объема термобаллона, капилляра и трубчатой пружины термометры с достаточной точностью могут работать без температурной компенсации при длине капилляра до 40 м.

Во всех случаях при эксплуатации необходимо предохранять манометр и капилляр от действия теплового излучения окружающих нагретых предметов.

Иногда для компенсации погрешностей от колебания температуры манометра применяют компенсационное устройство в виде биметаллической спирали, встроенной в передаточный механизм манометра. Биметаллическая спираль при изменении температуры манометра действует в обратном направлении относительно основной пружины.

К специфическим недостаткам газовых манометрических термометров относится их значительная тепловая инерция, обусловленная низким коэффициентом теплоотдачи от стенки термобаллона к наполняющему его газу и малой теплопроводностью последнего.

Действие жидкостных манометрических термометров основано на зависимости изменения давления от температуры

$$\Delta P = (\beta/\mu) \Delta t, \quad (6.6)$$

где ΔP — изменение давления, МПа; β — коэффициент объемного расширения жидкости, $1/^{\circ}\text{C}$; μ — коэффициент сжимаемости жидкости, $\text{см}^2/\text{кг}$; Δt — изменение температуры, $^{\circ}\text{C}$.

Из уравнения 6.5 видно, что изменение объема жидкости является линейной функцией температуры. Это определяет равномерность шкалы жидкостных термометров. Следует отметить, что погрешности от колебания температуры окружающей среды для жидкостных термометров больше, чем для газовых. Эти погрешности вычисляются по тем же формулам, что и для газовых термометров. Особенно значительные погрешности

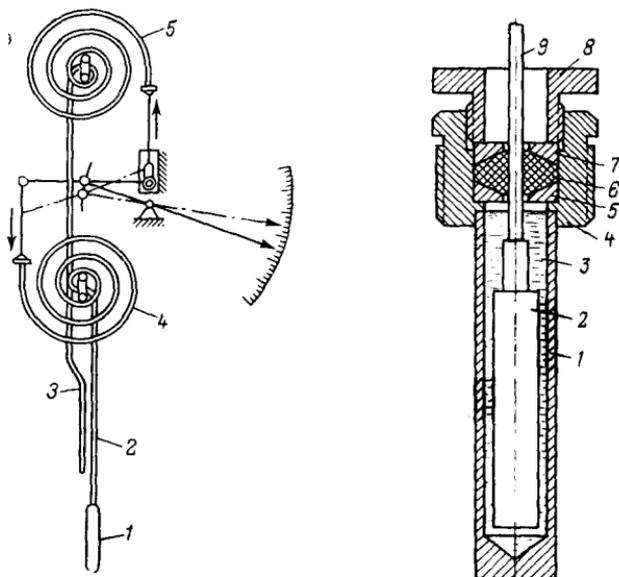


Рис. 6.5. Схема температурной компенсации ртутного манометрического термометра:

1 — термобаллон; 2 — основной капилляр; 3 — дополнительный капилляр; 4 — основная спиральная трубчатая пружина; 5 — вспомогательная спиральная трубчатая пружина

Рис. 6.6. Термобаллон манометрического термометра в защитной гильзе:

1 — защитная гильза; 2 — термобаллон; 3 — наполнитель гильзы; 4 — футеровка; 5 — нижняя разъемная шайба; 6 — уплотнительная набивка; 7 — верхняя разъемная шайба; 8 — ступка; 9 — капилляр

получаются при колебании температуры капилляра, поэтому при значительной его длине необходимо применять компенсационное устройство.

На рис. 6.5 показана схема компенсационного устройства, имеющего рядом с основным капилляром дополнительный (компенсационный) капилляр, один конец (у термобаллона) запаян, а другой соединен со вспомогательной (компенсационной) пружиной. Оба капилляра и обе пружины заполнены одной и той же рабочей жидкостью и имеют одинаковые характеристики. С изменением температуры окружающей среды давление жидкости в обоих капиллярах и в обеих пружинах изменяется, поэтому вспомогательная пружина действует в направлении, противоположном действию основной пружины и тем самым исключается влияние температуры окружающей среды на показания прибора.

Для жидкостных термометров следует также учитывать погрешность, вызванную различным положением термобаллона относительно манометра по высоте; эту погрешность можно компенсировать, корректируя нуль после установки прибора.

В конденсационных манометрических термометрах термо-

баллон обычно заполнен на $2/3$ объема низкокипящей жидкостью. В замкнутой системе термометра всегда существует динамическое равновесие одновременно протекающих процессов испарения и конденсации. При повышении температуры усиливается испарение жидкости и увеличивается упругость пара, а следовательно, усиливается также и процесс конденсации. В результате этого насыщенный пар достигает некоторого определенного давления, строго отвечающего температуре. Изменение давления насыщенного пара непропорционально изменению температуры, поэтому шкала конденсационного термометра получается неравномерной. Это — один из его недостатков.

Манометрические термометры всех видов характеризуются значительным запаздыванием показаний, зависящим от физического состояния наполнителей и их теплофизических характеристик. Газовые термометры имеют наибольшее запаздывание, а паро-жидкостные наименьшее (примерно в 2,5 раза меньше, чем газозаполненные); жидкостные термометры занимают промежуточное положение. При измерении температуры агрессивных сред или продуктов в аппаратах, работающих при высоких давлениях, термобаллон манометрического термометра устанавливают в защитную гильзу (рис. 6.6).

Для работы со вторичными приборами изготавливают манометрические термометры с электрической и пневматической дистанционными передачами показаний.

Приборостроительная промышленность выпускает термометры манометрические различных видов. Например, термометры манометрические газовые самонпущие одно- и двухзаписные с дисковой диаграммой; имеют обозначение ТГС-711, ТГС-712, а термометр манометрический показывающий местный конденсационный — ТКП-160.

6.3. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ТЕРМОМЕТРЫ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Измерение температуры по электрическому сопротивлению тел основано на зависимости его от температуры.

Электрические термометры сопротивления позволяют измерять температуру с высокой степенью точности — до $0,02^\circ\text{C}$, а при измерениях небольшой разности температуры — до $0,0005^\circ\text{C}$.

Термометры сопротивления по сравнению с манометрическими термометрами обладают следующими преимуществами: более высокой точностью измерения; возможностью передачи показаний на большие расстояния; возможностью централизации контроля температуры, достигаемой присоединением (через переключатель) нескольких термометров к одному измерительному прибору, и меньшим запаздыванием показаний.

Промышленные термометры сопротивления ГСП конструктивно состоят из термоэлемента (чувствительного элемента) и наружной (защитной) арматуры. В качестве материала для чувствительных элементов промышленных термопреобразователей сопротивления используют металлы с хорошей электропроводностью, такие как платина, медь. Чувствительный эле-

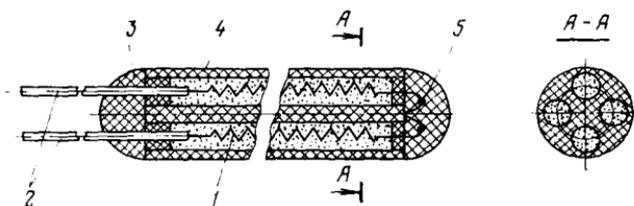


Рис. 6.7. Конструкция платинового чувствительного элемента:

1 — платиновая спираль; 2 — выводы; 3 — термоцемент; 4 — керамический каркас; 5 — папка спиралей

мент металлического термопреобразователя сопротивления представляет собой тонкую платиновую или медную проволоку, намотанную на каркас или свернутую в спираль, помещенную в каналы защитного каркаса (рис. 6.7).

Платиновые термометры сопротивления (ТСП) предназначены для измерения температур от -260 до 750°C . Для измерения низких температур (до -260°C) применяют ТСП1, защитная гильза которых заполнена гелием.

Медные термометры изготавливают только технические (тип ТСМ) по ГОСТ 6651—78. Конструктивная форма их показана на рис. 6.8.

Медную изолированную проволоку 1 диаметром 0,08 мм наматывают обычно без каркаса бифилярно и покрывают фторопластовой пленкой 2. Концы проволоки припаивают к выводам 3, которые присоединяют к зажимам головки термометра. Медные термометры выпускают для измерения температуры от -50 до 180°C .

Типы, основные параметры и размеры термометров сопротивления, выпускаемых промышленностью, регламентированы ГОСТ 6651—78. Условные обозначения градуировки термометров сопротивления ТСП установлены следующие: гр. 20, гр. 21, гр. 22, гр. 23 и гр. 24.

Для термометров с градуировкой 20, 21 и 22 начальное сопротивление (R_0) составляет соответственно 10; 46 и 100 Ом. Термометры сопротивления медные ТСМ выпускаются с сопротивлением $R_0=53$ Ом (гр. 23) и $R_0=100$ Ом (гр. 24).

Полные градуировочные таблицы с интервалами температур в 1°C приведены в приложении к ГОСТ 6651—78.

Терморезисторы. Для изготовления термопреобразователей сопротивления применяют также полупроводники, оксиды титана, магния, железа, никеля, меди или кристаллы некоторых

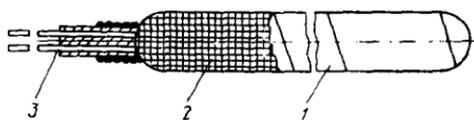


Рис. 6.8. Конструкция медного термометра сопротивления

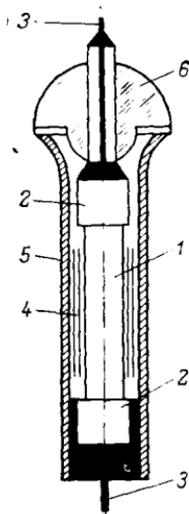


Рис. 6.9. Бусинковое полупроводниковое термосопротивление

металлов (например, германия). Существенным преимуществом полупроводниковых термометров (терморезисторов) является их большой температурный коэффициент электрического сопротивления. Поэтому из полупроводников можно делать термометры с большим начальным сопротивлением, что позволяет снизить до незначительных величин погрешности, вызываемые изменением температуры соединительных проводов.

Для измерения температуры наиболее часто применяют терморезисторы типов ММТ-1, ММТ-4, ММТ-6, КМТ-4, сопротивление которых в рабочих интервалах температуры изменяется по экспоненциальному закону.

Основными недостатками, препятствующими широкому внедрению терморезисторов в практику систем автоматического контроля, являются низкая воспроизводимость параметров, что исключает их взаимозаменяемость, а также сравнительно невысокая максимальная рабочая температура (от -60 до 180°C).

На рис. 6.9 показан стержневой терморезистор, представляющий собой цилиндр 1 с контактными колпачками 2, к которым припаяны выводы 3. Цилиндр покрыт эмалевой краской и обмотан металлической фольгой 4. Снаружи терморезистор защищен металлическим чехлом 5, в верхней части которого имеется стеклянный изолятор 6.

Измерительные приборы термометров сопротивления. Сопротивление термометров можно измерить по обычным в электротехнике мостовым схемам: уравновешенным и неуравновешенным.

Простейшая схема уравновешенного моста показана на рис. 6.10, а. Термометр сопротивления R_t и расположенные последовательно с ним два сопротивления R_2 соединительных линий включаются в плечо CB мостовой схемы. В диагональ DB моста подается напряжение от батареи B . Изменяя величину сопротивления R_3 , добиваются равенства напряжения в точках A и C , что констатируется отсутствием тока в диагонали AC гальванометром G . Такое положение соответствует равному отношению падения напряжения в плечах обеих ветвей моста.

Сопротивление линии $2R_2$ подгоночной катушкой устанавливается постоянным. Сопротивления R_2 и R_1 постоянны и выполнены (так же как и сопротивление R_3) из манганина. Мостовая схема, изображенная на рис. 6.10, а, отличается высокой точностью измерения и практически не зависит от напря-

жения батарей B . При нулевом отсчете по гальванометру отпадают погрешности, обусловленные температурой окружающей среды и посторонними магнитными воздействиями. Некоторую неопределенность в эту схему может внести переходное сопротивление передвигного контакта R_3 , а также возможное изменение сопротивления соединительных проводов R_n , поскольку изменяется их температура. Эти неопределенности практически можно исключить, если собрать мостовую схему, показанную на рис. 6.10, б. В этом случае передвигной контакт не относится к сопротивлению плеча AB , а включен в диагональ CA , сопротивление которой в момент отсчета (при нулевом токе) практически не имеет значения. Для устранения влияния возможного изменения сопротивления R_n соединительных линий на показания моста (точка B) перенесено к термометру.

В трехпроводной схеме влияние величины ΔR_n на показания будет существенно меньше (на порядок и больше), чем в двухпроводной схеме, даже для самой неблагоприятной точки шкалы. В трехпроводных схемах сопротивление каждой линии доводится до установленного значения R_n при помощи отдельных подгоночных сопротивлений в каждой линии.

На рис. 6.10, в показана схема неуравновешенного моста для измерения сопротивления R_t , включенного по трехпроводной схеме. В диагональ моста CA включается вместо гальванометра миллиамперметр mA . Напряжение питания моста в

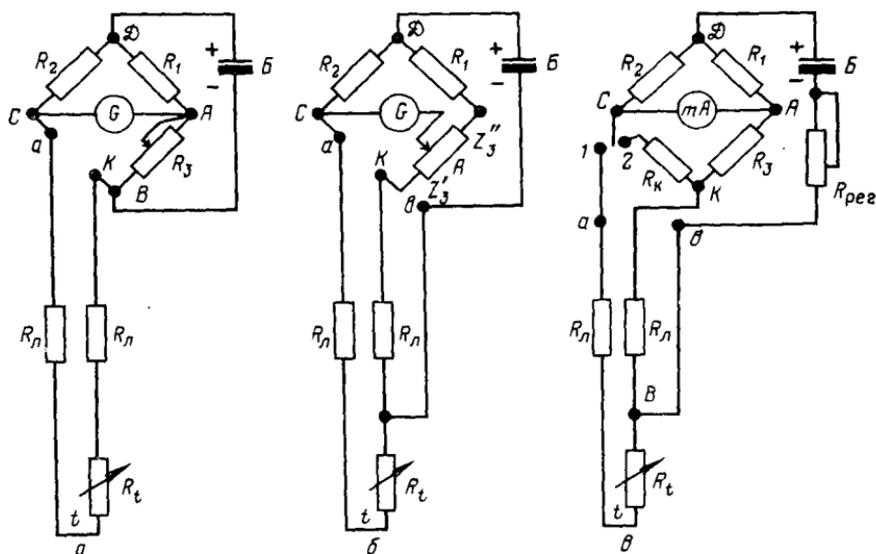


Рис. 6.10. Схемы измерительных мостов для измерения сопротивления термометров:

a — простейший уравновешенный мост; $б$ — уравновешенный мост с трехпроводным включением термометра; $в$ — неуравновешенный мост

диагонали BD должно поддерживаться постоянным. Контроль напряжения в диагонали BD осуществляется включением контрольного сопротивления R_k при переключателе в положении 2.

Для установленного значения напряжения при постоянных сопротивлениях плеч R_1, R_2, R_3 и R_k сила тока в диагонали CA будет иметь определенное значение, что контролируется миллиамперметром. Отклонение от установленной величины тока корректируется сопротивлением $R_{пер}$. После того, как установится напряжение E_{BD} в точках B и D , переключатель ставят в положение 1 и измеряют сопротивление R_t по силе тока i_{CA} в диагонали CA .

Недостаток схемы — необходимость поддержания постоянного напряжения в вершинах CA — можно легко устранить, применив источники стабилизированного питания типа ИПС по ГОСТ 1198—70.

В последние годы неуравновешенные мосты для измерения температур применяют редко, лишь в приборах для измерения величин, преобразуемых в активное сопротивление.

Логометры. Эти приборы предназначены в основном для измерения температуры при помощи термометров сопротивления. Логометры построены на принципе сравнения сил токов в цепях термометра и постоянного сопротивления.

Логометр представляет собой двухрамочный магнитоэлектрический миллиамперметр. Подвижная часть его (рис. 6.11,а) состоит из двух рамок R_1 и R_2 , жестко соединенных одна с другой и со стрелкой, конец которой перемещается вдоль шкалы. Рамки охватывают неподвижный сердечник C и могут перемещаться в зазоре переменной ширины между полюсами S и N постоянного магнита и сердечника. Вся подвижная система укреплена по центру сердечника, обычно на керновых опорах. Для подвода тока к рамкам применяют либо безмоментные вводы, практически не создающие противодействующего момента, либо маломощные спиральные пружины, противодейст-

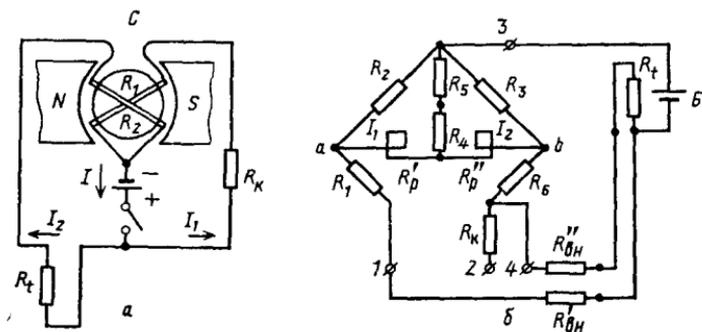


Рис. 6.11. Логометр:

а — принципиальная схема; б — электрическая схема; 1—4 — зажимы

вующий момент которых много меньше магнито-электрического момента рамок.

Обе рамки питаются от общего источника постоянного тока B (рис. 6.11, б) с напряжением E_B . Последовательно с рамкой R_1 включено постоянное сопротивление R_k , а последовательно с рамкой R_2 — термометр R_t . Магнитные моменты, возникающие в рамках, соответственно равны

$$M_1 = k_1 B_1 i_1; \quad (6.7)$$

$$M_2 = k_2 B_2 i_2, \quad (6.8)$$

где k_1 и k_2 — постоянные коэффициенты, определяемые геометрическими размерами рамок и числом витков проводов в них; B_1 и B_2 — магнитные индукции в местах расположения рамок.

В различных точках зазора переменной ширины магнитная индукция будет различной. Отношение индукции $B_1 : B_2$ для жестко скрепленных рамок зависит от их угла поворота

$$\varphi = f_1(B_1, B_2).$$

В положении равновесия магнитные моменты рамок будут равны

$$k_1 B_1 i_1 = k_2 B_2 i_2 \quad (6.9)$$

$$\text{или } B_1/B_2 = k_2 i_2 / k_1 i_1,$$

откуда угол поворота рамок

$$\varphi = f_2(i_2/i_1) = f_2[(R_1 + R_k)/(R_2 + R_t)] \quad (6.10)$$

Учитывая, что R_1 и R_2 и R_k практически постоянны,

$$\varphi = F(R_t). \quad (6.11)$$

Напряжение батареи B теоретически совсем не влияет на угол поворота рамок. Практически изменение напряжения становится заметным лишь при отклонениях, больших $\pm 20\%$ от номинального (расчетного) значения.

Для повышения чувствительности в реальные схемы включают рамки логометра R_p' и R_p'' в диагональ неуравновешенного моста с постоянными сопротивлениями R_1 , R_2 и R_3 (рис. 6.11, б). Манганиновое R_4 и медное R_5 сопротивления служат для уменьшения общего температурного коэффициента логометра (при изменении температуры окружающей среды). Термометр R_t с сопротивлениями линий R_n может быть включен в трехпроводной схеме. В цепь термометра сопротивления вводится нормально закороченное сопротивление R_k (иногда обозначаемое R_3). При контроле работы логометра снимают закорачивающий шунт сопротивления R_k и закорачивают термометр R_t , соединяя точки 1 и 2 схемы. Стрелка логометра должна при этом устанавливаться на определенном значении шкалы прибора (красной черте).

Класс точности переносных логометров (по ГОСТ 9736—68) составляет 0,2; 0,5 и 1,0, а стационарных щитовых 0,5; 1,0;

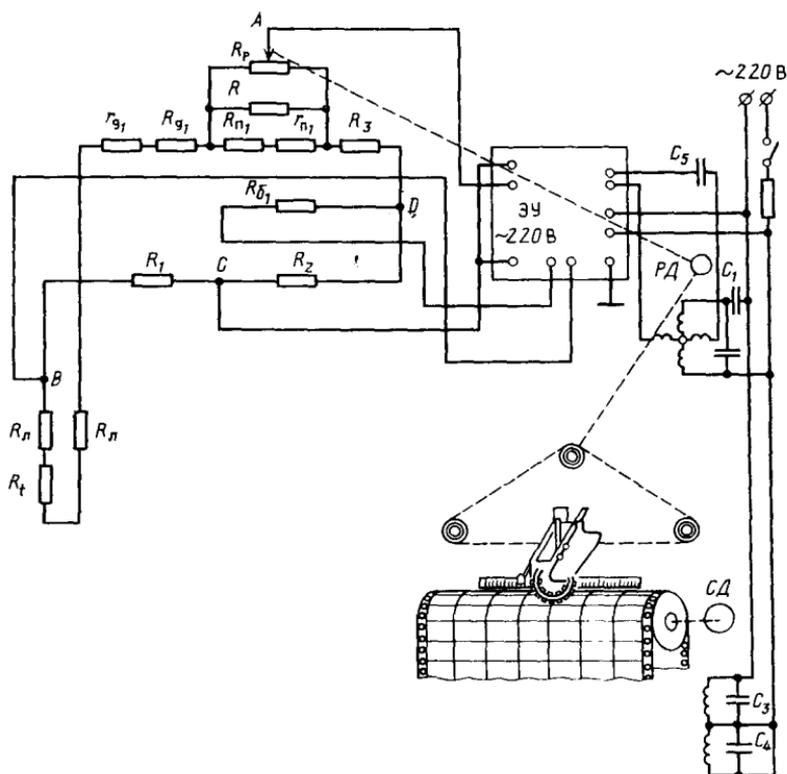


Рис. 6.12. Автоматический уравновешенный электронный мост типа КСМ-4 (СД — синхронный двигатель)

1,5; 2,0 и 2,5. Логометры могут быть показывающими самопишущими до 12 точек измерения, а также иметь дополнительные устройства для регулирования и сигнализации.

Автоматические мосты. В автоматических уравновешенных мостах (рис. 6.12) движок реохорда перемещается автоматически. Измерительная схема мостов питается как постоянным, так и переменным током. В автоматических мостах переменного тока решающее влияние на измерение имеют активные сопротивления, поэтому приведенные выше соотношения для мостов постоянного тока сохраняются и для автоматических мостов переменного тока. Последние имеют ряд преимуществ перед мостами постоянного тока: измерительная схема питается от одной из обмоток силового трансформатора электронного усилителя, т. е. не требуется дополнительного источника питания и отпадает необходимость в применении вибрационного преобразователя.

Существует много различных модификаций автоматических уравновешенных мостов, однако принцип их работы одинаков. В качестве примера здесь рассматривается принципиальная

схема электронного автоматического уравновешенного моста типа КСМ-4. Питание моста подается в диагональ BD от отдельной обмотки трансформатора в усилителе ЭУ. Для получения расчетного напряжения на вершинах B и D в диагональ включается балластное сопротивление $R_{б1}$. Термометр R_t включен по трехпроводной схеме в плечо моста AB . Реохорд R_p вместе с шунтирующим сопротивлением $R_{ш}$, как обычно, имеет приведенное сопротивление, равное 90 Ом.

Сопротивления $R_{п1} + r_{п1}$ и $R_{д1} + r_{д1}$ определяют пределы измерения по шкале. Значения сопротивлений моста R_1 , R_2 и R_3 определяются соответствующим расчетом. Измерительная схема питается переменным током. Это исключает необходимость применения вибрационного преобразователя. Поскольку мост является уравновешенным, нет необходимости строго выдерживать постоянно напряжения на вершинах B и D . Поэтому никаких стабилизаторов напряжения не предусмотрено. Уравновешенные мосты выпускают нескольких модификаций. Они могут быть односточечными и многоточечными на 6, 12 и 24 точки; класс точности уравновешенных мостов 0,5.

Для дистанционного измерения температуры применяют преобразователи различных типов. Они рассмотрены выше.

6.4. ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ТЕРМОМЕТРЫ

Измерение температуры термоэлектрическими преобразователями основано на термоэлектрическом эффекте Зеебека: в замкнутой цепи, состоящей из двух или нескольких разнородных проводников, возникает электрический ток, если хотя бы два места соединения (спая) проводников имеют разную температуру.

Цепь, состоящая из двух разнородных проводников (рис. 6.13) называется термоэлектрическим преобразователем (ТЭП). Спай, имеющий температуру t , называется горячим или рабочим, а второй, имеющий постоянную температуру t_0 — холодным или свободным. Проводники A и B называются термоэлектродами. Термоэлектрический эффект объясняется наличием в металле свободных электронов, число которых в единице объема различно для разных металлов. В спая с температурой t электроны из металла A диффундируют в металл B в большем количестве, чем обратно. Поэтому металл A заряжается положительно, а металл B отрицательно.

Если для данной термопары найдена зависимость $\{E_{AB} = f(t)\}$, определяемая градуировкой, то измерение температуры сводится к определению т. э. д. с. термопары.

Для включения измерительного прибора в цепь ТЭП необходимо разорвать электрическую цепь. Сделать это можно в спая с температурой t_0 (рис. 6.14, а) или в одном из термоэлектродов (рис. 6.14, б).

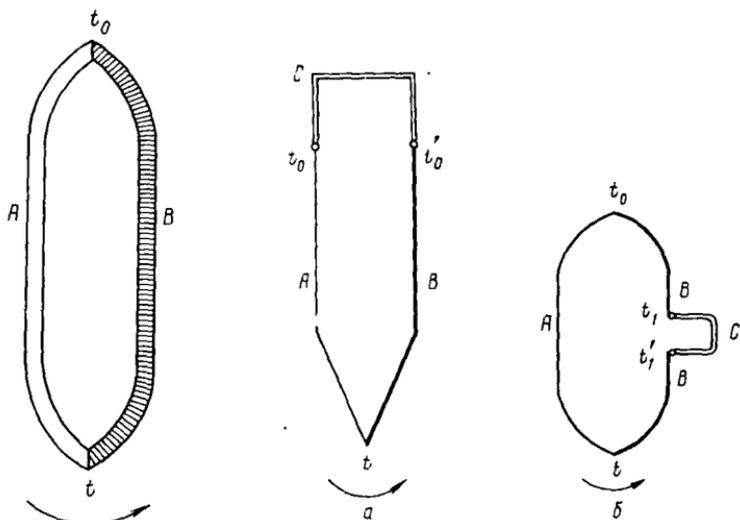


Рис. 6.13. Термоэлектрическая цепь из двух проводников

Рис. 6.14. Цепь с третьим проводником С, включенным в шпай термоэлектропреобразователя (а) и включенным в термоэлектрод термомпары (б)

Несмотря на внешнее различие схем, показанных на рис. 6.14, т. э. д. с., развиваемые термоэлектрическими преобразователями ТЭП одинаковы, если температуры t , t_0 и температуры концов проводника С также одинаковы. Из этого следует, что т. э. д. с. ТЭП не изменяется от введения в его цепь третьего проводника, если концы этого проводника имеют одинаковые температуры. На этом основании в цепь ТЭП включают соединительные провода, измерительные приборы и подгоночные сопротивления.

При неравенстве температур концов третьего проводника т. э. д. с. ТЭП уменьшится на величину э. д. с. паразитной пары АС (рис. 6.14, а) при температурах концов проводника t_1 и t_1' и t_0 и t_0' . Из этого следует, что в цепи ТЭП желательно применять проводники, термоэлектрические свойства которых незначительно отличаются от таковых свойств термоэлектродов термоэлектрических преобразователей.

Как уже говорилось, т. э. д. с. ТЭП является функцией измеряемой температуры лишь при условии постоянства температуры холодного спая ($t_0 = \text{const}$).

ТЭП градуируют при определенной постоянной температуре холодного спая (обычно при $t_0 = 0^\circ\text{C}$, реже при $t_0 = 20^\circ\text{C}$). При измерениях температура холодного спая может быть иной (t_0'), не равной температуре градуировки. Несовпадение температур t_0 и t_0' вызывает необходимость внесения поправки. Величину поправки можно получить для данного ТЭП из градуировочной таблицы или при небольших значениях разности $t_0' - t_0$ — из

характеристической кривой. При этом можно принять прямолинейную зависимость $E=f(t)$.

В дальнейшем величину т. э. д. с. ТЭП будем обозначать E_T . По ГОСТ 3044—77 принято шесть видов технических термоэлектрических преобразователей с металлическими термоэлектродными парами. Платинородий (90% платины+10% родия) — платиновые ТЭП (тип ТПП имеет градуировку ПП₆₈). В зависимости от назначения эти ТЭП разделяют на эталонные, образцовые и рабочие.

Платинородий — платиновые преобразователи надежно работают в нейтральной и окислительных средах, но быстро выходят из строя в восстановительной среде. К недостаткам преобразователей этого типа следует отнести малую т. э. д. с. по сравнению с т. э. д. с. других ТЭП. Диаметр термоэлектродной проволоки, применяемой для ТЭП типа ТПП, составляет 0,3 или 0,5 мм.

Платинородий (30% родия) — платинородиевый (6% родия) ТЭП (тип ТПР) имеет градуировку ПР 30/6₆₈. Особенностью преобразователя данного типа является то, что он развивает очень малую т. э. д. с. (0,04 мВ при 120°C и 0,002 мВ при 20°C), что не требует поправки на температуру холодных спаев.

Хромель — алюмелевый преобразователь (94% Ni+2% Al+2,5% Mn+1% Si+0,5% примеси) ТЭП (тип ТХА) имеет градуировку ХА₆₈. Эти ТЭП применяют для измерения температур до 1300°C. Кривая зависимости т. э. д. с. для данного преобразователя близка к прямой. ТЭП типа ТХА хорошо работает в окислительных средах и сравнительно быстро разрушается в восстановительной среде.

Хромель — копелевый преобразователь (56% Cu+44% Ni) ТЭП (тип ТХК) имеет градуировку ХК₆₈. Эти ТЭП развивают наибольшую т. э. д. с. из всех стандартизованных ТЭП, что позволяет изготавливать измерительные комплекты с узкой температурной шкалой, например 0—300°C.

Стандартные ТЭП типа ТХК и ТХА изготавливают из термоэлектродной проволоки диаметром от 0,7 до 3,2 мм.

Вольфрамренийевый преобразователь (20% рения, тип ВР-5/20) применяют для измерения температуры до 2300°C в нейтральной и восстановительной средах, а также для измерения температуры расплавленных металлов.

Иногда применяют и нестандартизованные преобразователи. Из них наиболее широко используют медь — копелевые, железо — константановые и медь — константановые ТЭП. Нестандартизованные ТЭП после изготовления подвергают обязательной индивидуальной градуировке.

Конструктивное оформление термоэлектрических преобразователей разнообразно и зависит главным образом от условий их применения. На рис. 6.15 показан ТЭП типичной конструкции. Как правило, рабочий спай промышленных ТЭП изготов-

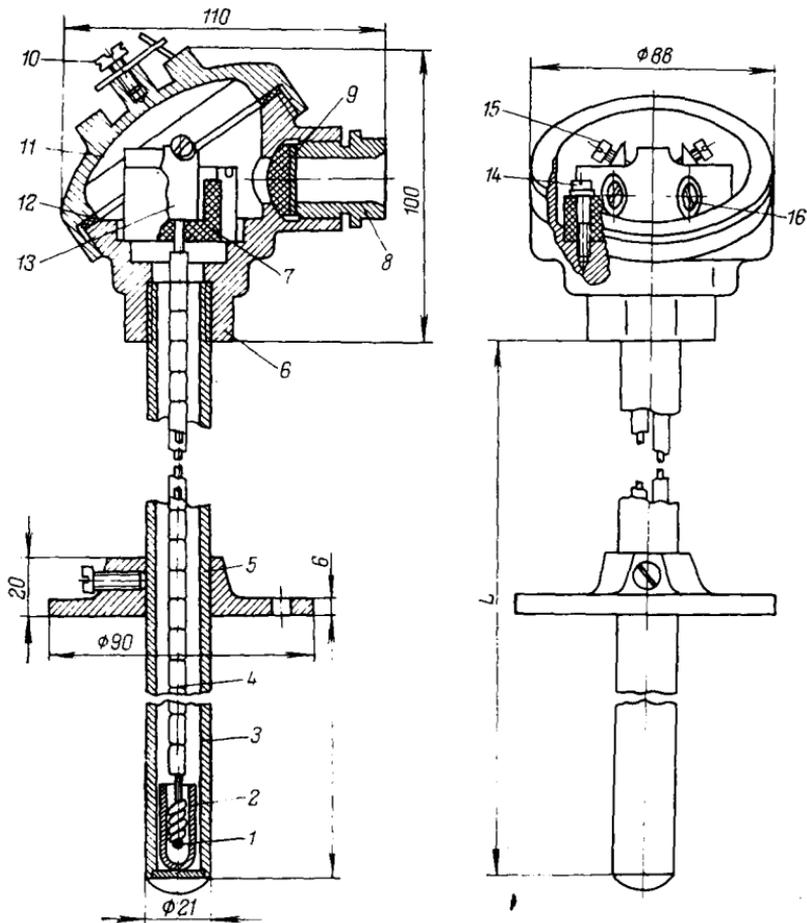


Рис. 6.15. Термопара в защитной арматуре с передвижным фланцем:

1 — горячий спай термопары; 2 — фарфоровый наконечник; 3 — защитная трубка; 4 — фарфоровые двухканальные бусы; 5 — передвижной фланец для крепления термопары; 6 — корпус головки; 7 — фарфоровая головка; 8 — штуцер для проводов; 9 — асбестовый шнур; 10 — винт для цепочки; 11 — крышка; 12 — прокладка; 13 — зажимы; 14 — винты для крепления колодки; 15 — винты для крепления проводов; 16 — винты для крепления термоэлектродов в зажимах

ляют сваркой в пламени вольтовой дуги. ТЭП из неблагородных металлов сваривают под слоем флюса, а ТЭП из платиновой группы — без флюса. Пайку применяют только при изготовлении нестандартизованных ТЭП из очень тонкой термоэлектродной проволоки.

Из специальных следует назвать многозонный ТЭП (рис. 6.16), применяемый для позонного измерения температуры в вертикальных аппаратах (в колоннах синтеза аммиака, метанола и др.). Чехол такого ТЭП представляет собой трубу, в которую помещен пучок изолированных один от другого ТЭП различной длины. Провода, соединяющие ТЭП с измеритель-

ным прибором, изготавливают из материалов, которые в паре между собой развивают те же э. д. с. (при тех же температурах), что и ТЭП, к которому они подсоединены. Такое требование ограничивается температурой примерно 100 °С, выше которой характеристики ТЭП и соединительных проводов могут различаться. Это допустимо, так как температура соединительных проводов обычно не бывает высокой. При соблюдении указанного требования провода удлиняют ТЭП на длину соединительных проводов, а свободные концы ТЭП оказываются на клеммах прибора, предназначенного для измерения т. э. д. с.

Несоблюдение указанного выше требования привело бы к возникновению «паразитных» э. д. с. в результате образования спаев в местах соединения свободных концов ТЭП с соединительными проводами. Например, для ТЭП типа ТХК применяют хромелькопелевые провода, а для ТЭП типа ТХА — один провод медный, а второй константановый (60% Cu и 40% Ni). Измерительные преобразователи для ТЭП рассмотрены выше.

Приборы для измерения термоэлектродвижущих сил. Для измерения т. э. д. с. в комплектах термоэлектрических термометров применяют магнито-электрические милливольтметры и потенциометры.

Милливольтметры делятся на переносные и стационарные, а потенциометры — на лабораторные, переносные и автоматические. Милливольтметры — магнитоэлектрические приборы, работа их основана на взаимодействии проводника, по которому течет ток, и магнитного поля постоянного магнита. Магнитная система милливольтметра (рис. 6.17) состоит из магнита, полюсных наконечников и цилиндрического сердечника. В кольцевом воздушном зазоре между полюсными наконечниками и сердечником вращается рамка из медного или реже алюминиевого изолированного провода. Чаще всего рамки крепятся на кернах, которые опираются на подпятники из агата или рубина. Момент, противодействующий вращению рамки, создается

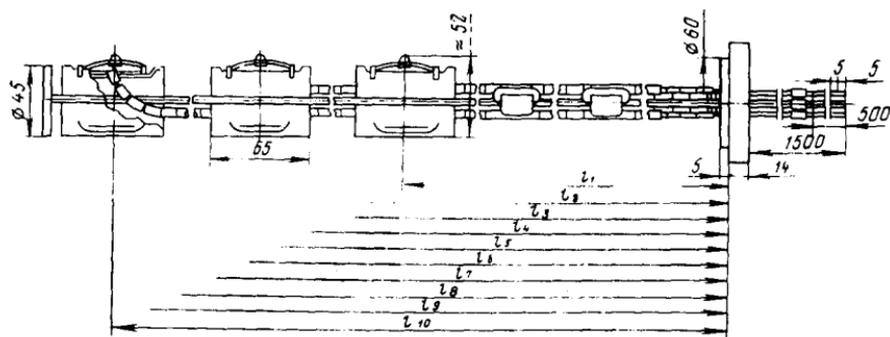


Рис. 6.16. Габаритный чертеж приборов типа ТХК-0579:

$l_1=630-4070$ мм; $l_2=1350-4400$ мм; $l_3=1895-5550$ мм; $l_4=2125-4920$ мм; $l_5=2355-5200$ мм; $l_6=2385-5900$ мм; $l_7=2815-5780$ мм; $l_8=3045-6120$ мм; $l_9=3275-6680$ мм; $l_{10}=3505-7400$ мм

спиральными пружинками, которые одновременно служат и для подвода тока к рамке.

В регистрирующих приборах рамка подвешена на тонких металлических лентах (рис. 6.18). Грузиками подвижная система уравнивается так, что центр ее тяжести находится на оси рамки. Ток, протекая через рамку, вызывает появление двух одинаковых сил, направленных в разные стороны и стремящихся повернуть рамку.

Сила тока, протекающего по рамке, определяется т. э. д. с. термоэлектрического преобразователя E_T и сопротивлением электрической цепи R , т. е.

$$I = E_T / R. \quad (6.12)$$

Сопротивление цепи складывается из сопротивления ТЭП R_T , сопротивления соединительных проводов $R_{с.п}$ и сопротивления рамки R_p , т. е.

$$R = R_T + R_{с.п} + R_p. \quad (6.13)$$

Следовательно, для угла поворота рамки получим

$$\varphi = KE_T / (R_T + R_{с.п} + R_p). \quad (6.14)$$

Из уравнения (6.14) следует, что для получения однозначной зависимости угла поворота рамки со стрелкой от т. э. д. с. ТЭП E_T необходимо, чтобы сопротивление цепи оставалось всегда постоянным. Но если при стационарных условиях работы милливольтметра сопротивление рамки R_p можно считать

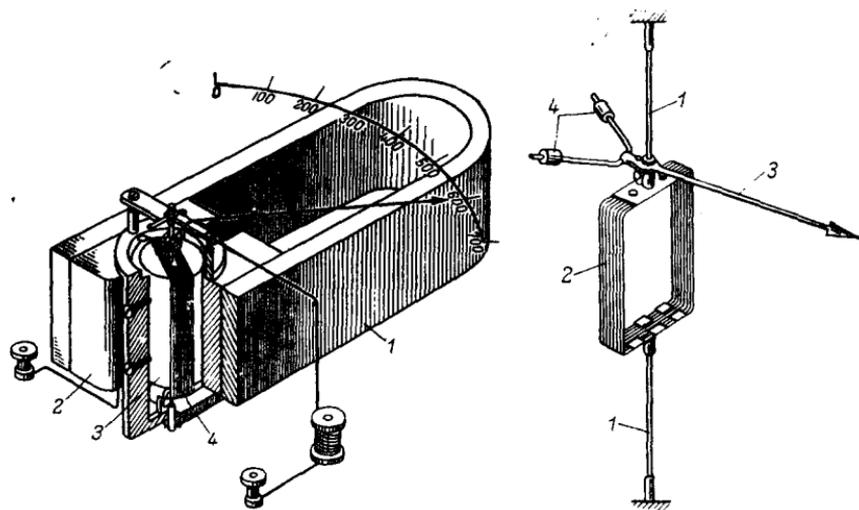


Рис. 6.17. Магнитная и подвижная системы милливольтметра:

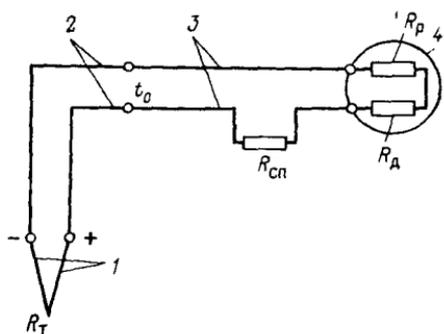
1 — постоянный магнит; 2 — полюсный наконечник; 3 — сердечник; 4 — рамка

Рис. 6.18. Схема крепления рамки на ленточных подвесках:

1 — лента подвеса; 2 — рамка; 3 — стрелка; 4 — грузики

Рис. 6.19. Схема включения соединительных проводов:

1 — ТЭП; 2 — термоэлектродные провода; 3 — соединительные провода; 4 — прибор



практически постоянным, то сопротивление ТЭП R_1 колеблется при изменении измеряемой температуры. Сопротивление соединительных проводов $R_{с.п.}$ при изменении температуры окружающей среды также приводит к появлению погрешности измерения.

Схема включения соединительных проводов показана на рис. 6.19. Точность измерения температуры милливольтметром 4 тем выше, чем большая часть сопротивления приходится на рамку и чем меньше сопротивления имеют соединительные провода 3 и термоэлектродные провода 2 ТЭП. Для снижения указанной погрешности увеличивают сопротивление цепи последовательным подключением к рамке дополнительного сопротивления $R_д$ в виде катушки из манганиновой проволоки (практически с неизменяющимся сопротивлением при изменении температуры). Практически сопротивление $R_д$ в милливольтметрах колеблется от 100 до 500 Ом. Для получения правильных показаний действительное значение

$$R_{вн} = R_T + R_{с.п.}, \quad (6.15)$$

должно соответствовать расчетному. В приборах отечественного производства расчетная величина $R_{вн}$ равна одному из следующих значений: 0,6; 1,6; 5; 15 и 25 Ом. Под это расчетное сопротивление, указанное на шкале милливольтметра, подгоняется при монтаже фактическое сопротивление ТЭП (R_1) и сопротивление соединительных проводов.

Чтобы исключить погрешности, связанные с изменением сопротивления соединительных проводов и ТЭП при эксплуатации, температура соединительных линий должна быть близкой к 20°C, а глубина погружения ТЭП должна соответствовать градуировочной. Если шкала милливольтметра выражена только в милливольтгах, то к нему можно подключить терморяду любой градуировки. Определив по шкале милливольтметра напряжение и зная величины $R_д$ и $R_{вн}$, можно найти величину т. э. д. с. из уравнения

$$E_T = U_m (R_д + R_{вн}) / R_д, \quad (6.16)$$

где U_m — напряжение, измеряемое милливольтметром.

Зная E_T , по градуировочным таблицам для применяемого ТЭП определяют температуру. Если температура свободных концов ТЭП в процессе измерения изменяется в широких пределах, применяют метод компенсации температуры холодных

приборов 1,0 и 1,5. При измерении температуры в нескольких местах одного и того же объекта применяют милливольтметры с многоточечными переключателями.

В качестве примера такого прибора может служить милливольтметр типа Ш 69004, причем встроенный в общий корпус милливольтметра многоточечный переключатель типа П 691 позволяет измерять температуру в двенадцати точках, т. е. одним прибором с 12 термоэлектрическими преобразователями.

Потенциометры. Принцип действия потенциометров основан на уравнивании (компенсации) измеряемой т. э. д. с. с известной разностью потенциалов. Эта разность потенциалов создается в потенциометре посторонним источником энергии. Принципиальная схема потенциометра показана на рис. 6.21.

В этой схеме имеются три электрические цепи. В цепь источника тока (компенсационную) входит источник тока B , регулировочное сопротивление R_b (реостат), постоянное сопротивление $R_{нз}$ и сопротивление реохорда R_p с перемещающимся вдоль него контактом D . В цепь нормального элемента входит нормальный элемент $НЭ$, сопротивление $R_{нз}$ и нулевой прибор $НП$. В цепь ТЭП входят ТЭП, нулевой прибор $НП$ и часть измерительного сопротивления R_p . Нормальный элемент, предназначенный для контроля постоянства разности потенциалов между конечными точками реохорда, развивает постоянную во времени э. д. с.

Обычно применяют ртутно-кадмевый гальванический элемент Вестона, развивающий при 20°C э. д. с. 1,01830 В. Пользуясь нормальным элементом, можно довольно точно установить постоянство разности потенциалов на концах реохорда. Для этой цели переключатель $П$ переводят на контакт K , включая $НП$ в цепь $НЭ$ и одновременно разрывая цепь ТЭП.

Нормальный элемент присоединяется к концам сопротивления $R_{нз}$ так, что его э. д. с. оказывается направленной навстречу э. д. с. источника тока B . Регулируя силу тока в компенсационной цепи реостатом R_b , добиваются такого положения, при котором разность потенциалов на концах сопротивления равна э. д. с. $НЭ$. При этом сила тока в цепи нормального элемента равна нулю и стрелка $НП$ устанавливается на нуле шкалы. В этом случае сила тока в компенсационной цепи

$$I_1 = E_{нз} / R_{нз}. \quad (6.17)$$

Для измерения т. э. д. с. ТЭП переключатель $П$ переводят на контакт $И$, подключая тем самым ТЭП последовательно с $НП$ к измерительному сопротивлению в точке $в$ и скользящему контакту. Термо-э. д. с. ТЭП тогда будет действовать в сторону, противоположную э. д. с. источника тока B .

Перемещая контакт D , находят такое его положение, при котором разность потенциалов между точками $в$ и D измерительного сопротивления равна т. э. д. с. термопары, при этом сила тока в цепи ТЭП равна нулю, тогда

$$E_T = i R_{bD} (E_{нз} / R_{нз}) R_{6D}. \quad (6.18)$$

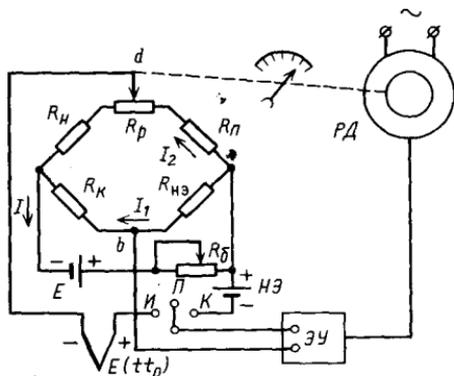


Рис. 6.22. Принципиальная схема электронного автоматического потенциометра

Так как $E_{НЭ}$ и $R_{НЭ}$ постоянны, определение т. э. д. с. ТЭП сводится к определению участка измерительного сопротивления $R_{БД}$. Измерение т. э. д. с. компенсационным методом осуществляется в отсутствие тока в цепи термоэлектрорепрообразователя, поэтому сопро-

тивление цепи ТЭП, соединительных проводов, НП, а следовательно, и его зависимость от температуры не оказывает влияния на точность измерения. Это свойство является одним из существенных преимуществ компенсационного метода измерения. Промышленность выпускает большое количество переносных технических и лабораторных потенциометров различных типов. В зависимости от назначения и точности показаний они подразделяются на три класса: 1-й, 2-й и 3-й. Потенциометры 1-го и 2-го классов снабжены свидетельством с указанием их погрешностей и используются в качестве образцовых. Потенциометры 3-го класса используются как рабочие.

В автоматических потенциометрах в отличие от рассмотренных выше взамен стрелочного нулевого прибора установлены электронные нуль-индикаторы. Автоматические электронные потенциометры работают в комплекте с одним из стандартных ТЭП. Измерительные схемы всех автоматических потенциометров предусматривают автоматическое введение поправки на температуру свободных концов ТЭП. Поэтому их выполняют в виде неуравновешенного моста.

Все сопротивления измерительной схемы (рис. 6.22), кроме R_K , выполнены из манганина, сопротивление R_K — из меди или никеля. Цепь источника тока состоит из двух ветвей: рабочей, в которую включен реохорд R_P , и вспомогательной, состоящей из двух сопротивлений $R_{НЭ}$ и R_K . Наличие вспомогательной ветви позволяет автоматически ввести поправку на температуру холодных спаев термопары. Сопротивление R_K и холодные спаи термопары должны находиться при одинаковой температуре. В приборе сопротивление R_K расположено недалеко от места подключения термопар.

Измеряемая т. э. д. с. ТЭП компенсируется падением напряжения на сопротивлении R_P , зависящего от положения движка реохорда, и сопротивлениях R_H и R_K

$$E_T = I_2 R_P + I_2 R_H - I_1 R_K. \quad (6.19)$$

Повышение температуры холодных спаев вызывает уменьшение т. э. д. с. ТЭП на величину E_{T_1} . При этом падение напря-

жения на сопротивлении R_k одновременно возрастает, тогда

$$E_T - E_{T_1} = I_2 R_p + I_2 R_n - I_1 (R_k + \Delta R_k). \quad (6.20)$$

Чтобы движок реохорда сохранил свое положение и потенциометр показывал измеряемую температуру, необходимо обеспечить равенство

$$E_{T_1} = I_1 \Delta R_k. \quad (6.21)$$

Если т.э.д.с. ТЭП E_T не равна падению напряжения U_{bd} , то напряжение небаланса $E_T - U_{bd}$ подается на вход преобразовательного каскада.

В преобразовательном каскаде постоянное напряжение небаланса преобразуется в переменное, которое затем усиливается до значения, достаточного для вращения реверсивного двигателя $РД$, который передвигает движок реохорда и восстанавливает равновесие измерительной схемы. Одновременно $РД$ перемещает показывающую стрелку и записывающее перо. При равновесии измерительной схемы, когда $E_T = U_{bd}$, реверсивный двигатель не вращается, так как на вход преобразовательного каскада напряжение не подается.

Чтобы установить силу рабочего тока I_1 , переключатель $П$, нормально находящийся в положении $И$ (измерение), нажатием кнопки механизма установки рабочего тока переводится в положение $К$ (контроль). При этом одновременно устанавливается кинематическая связь реверсивного двигателя с движком реостата R_b и подключается электронный усилитель к цепи нормального элемента.

Если падение напряжения $I_1 R_{нз}$ не равно э.д.с. нормального элемента, то электронный усилитель, как при измерении т.э.д.с. ТЭП, получает сигнал, равный разности между э.д.с. нормального элемента и падением напряжения на сопротивлении $R_{нз}$. Реверсивный двигатель, вращаясь по часовой стрелке или против нее, в зависимости от знака небаланса, передвигает движки реостата R_b , изменяя величину питающего напряжения. В момент равновесия, когда $I_1 = E_{нз}/R_{нз}$, на электронный усилитель сигнал не подается, и реверсивный двигатель останавливается. В этот момент устанавливается вполне определенное значение силы рабочего тока I_r .

В электронных потенциометрах для усиления напряжения небаланса применяют электронные усилители переменного тока.

Приборостроительные заводы нашей страны выпускают много разновидностей электронных автоматических потенциометров. Все они соответствуют требованиям общесоюзного стандарта ГОСТ 7164—78 «Приборы автоматические следящего уравновешивания ГСП»; принципиальные схемы, точность измерения и другие технические показатели этих приборов мало чем различаются.

Унифицированная система автоматических потенциометров, автоматических измерительных уравновешенных мостов и миллиамперметров получила общее условное обозначение КС (Комплекс самописцев).

Промышленность выпускает потенциометры нескольких типов. К ним относятся потенциометр типа КПП1 — электронный автоматический показывающий; КСП 1, КСП 2 — электронный автоматический показывающий и самопишущий с записью на ленточной диаграмме; КСПЗ-П — электронный автоматический показывающий и самопишущий одноточечный с записью на дисковой диаграмме; КСПЗ-ПИ — автоматический показывающий, самопишущий и регулирующий с искробезопасной измерительной схемой; КСП 4 — автоматический показывающий, самопишущий и регулирующий на складывающейся диаграмме; КСПП 4 — двухканальный автоматический самопишущий.

В XII пятилетке взамен приборов серии КС будут выпускаться аналоговые приборы серии А, которые выполняются на микроэлектронной базе. Приборами А550-001 — А550-001-05 заменяются одноканальные потенциометры КСУ 4 без регулирующих устройств; А682-002 — 682-002-03 заменяются многоканальные приборы КСП 4, КСМ 4 без регулирующих устройств; А683-001-4 — А683-001-07 заменяются многоканальные приборы КСП 4, КСМ 4 с двухпозиционными регулируемыми устройствами; приборы А550, А650, А660, А682, А683 имеют равномерные шкалы.

В приборах серии А применяется лента диаграммная типа ЛПГ-250 с намоткой координатной сетки наружу.

Взамен приборов КСПЗ-П, КСМЗ-П будут выпускаться электронные приборы «Диск-250». В этих приборах используются резисторные микросборки. Применение в приборах «Диск-250» схемы с предварительным усилением позволяет реализовать функции сигнализации, регулирования и преобразования входного сигнала в выходной электрическими методами с применением элементов микроэлектроники.

Потенциометры выпускаются как одноточечными, так и многоточечными. Последние снабжены переключателями ТЭП. Основная погрешность показаний потенциометров лежит в пределах от $\pm 0,25$ до $\pm 0,5\%$ от диапазона измерений, записи $\pm 1,0\%$ от диапазона измерений. Вариация показаний не превышает 0,5 абсолютного значения основной погрешности.

6.5. ОБЩИЕ УСЛОВИЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУР КОНТАКТНЫМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ

При использовании контактных методов измерения температуры необходимо создать такие условия, при которых термопреобразователь принимает температуру, наиболее близкую к температуре измеряемой среды, и возможно меньше искажает температурное поле измеряемой среды.

Основные специфические погрешности контактных методов измерения стационарных температур, помимо чисто инструментальных, обусловлены: а) лучистым теплообменом между термодатчиком и окружающими его телами; б) отводом тепла теплопроводностью по арматуре и деталям термодатчика; в) дополнительным нагревом газа вследствие трения элементов в области расположения термодатчика.

Если объем тела достаточно большой и возможно погружение термодатчика на достаточную глубину, то вполне обеспечивается тепловое равновесие между измеряемым телом и термодатчиком. Большие трудности возникают при измерении температуры твердых тел с небольшим объемом, особенно если в них имеются значительные температурные перепады. Применяемые в этом случае термодатчики должны иметь малые размеры. При этом между термодатчиком и измеряемым твердым телом должен быть обеспечен хороший тепловой контакт.

Наиболее сложно измерять температуру движущихся поверхностей (валцов, каландров и т. п.). В этом случае при измерениях контактным способом возникает ряд дополнительных погрешностей, связанных с трением датчика о поверхность, температуру которой измеряют. Погрешности эти зависят от правильности контакта датчика, чистоты контролируемой поверхности и др.

Для контроля температуры поверхностей вращающихся валковых машин применяют как переносные, так и стационарные ТЭП различных конструкций. Измерение температуры почти всегда сопровождается теплообменом между термодатчиком и окружающими его телами. Часто затруднительно обеспечить равенство температур датчика и измеряемой среды. Разность между указанными температурами составляет ошибку измерения. Величина ошибки зависит от разности температур термодатчика и стенки трубопровода. Уменьшение ошибки в этом случае достигается тепловой изоляцией трубопровода на том участке, где установлен термодатчик. Кроме погрешностей, вызванных лучистым теплообменом, могут возникать погрешности вследствие отвода тепла по защитной трубке ТЭП к более холодным стенкам трубы (рис. 6.23).

Общих правил установки термодатчика не существует. Можно указать лишь на те условия, которых необходимо придерживаться при установке датчиков. При измерении температуры газов или паров, протекающих по трубопроводу, датчики всех видов (стеклянные термометры, монотермические термометры, ТЭП, термометры сопротивления) следует располагать против направления потока в его центре, где скорости максимальны. В этом случае коэффициент теплоотдачи в месте соприкосновения потока с датчиком возрастает вследствие разрушения пограничного слоя.

Радialное расположение термopриемника допустимо лишь тогда, когда возможно его погружение на достаточную глубину, т. е. в трубопроводах большого диаметра. Если термopриемник невозможно установить против потока, то следует устанавливать его наклонно к оси трубопровода.

6.6. ПИРОМЕТРЫ ИЗЛУЧЕНИЯ

Пирометры излучения основаны на измерении лучистой энергии, испускаемой нагретым телом. Наибольшее распространение пирометры излучения получили в металлургии, однако и в химической промышленности они находят некоторое применение (печи, топки котельных установок и др.).

Пирометры излучения по сравнению с другими приборами измерения температуры имеют следующие преимущества: а) измерение осуществляется бесконтактным способом, следовательно, отсутствует искажение температурного поля, вызванное введением датчика прибора в измеряемую среду; б) верхний предел измерения температуры теоретически не ограничен; в) возможность измерения высоких температур газовых потоков при больших скоростях.

Тепловое излучение представляет собой процесс распространения внутренней энергии излучаемого тела электромагнитными волнами. При поглощении электромагнитных волн от излучающего тела другими телами электромагнитные волны вновь превращаются в тепловую энергию. Тела излучают электромагнитные волны широкого диапазона длин от $\lambda=0$ до $\lambda=\infty$.

Большинство твердых и жидких тел обладают непрерывным спектром излучения, т. е. излучают волны всех длин. Другие тела (чистые металлы и газы) обладают селективным спектром излучения, т. е. излучают волны только на определенных участках спектра. Участок, начиная от волн длиной $\lambda=0,4$ до $\lambda=0,76$ мкм, соответствует видимому спектру. Каждая длина волны видимого спектра соответствует определенному цвету. Волны длиной λ от $0,4$ до $\lambda=0,44$ мкм соответствуют темно-фиолетовому цвету; от $\lambda \approx 0,44$ до $\lambda \approx 0,49$ мкм — синне-голубому; от $\lambda=0,49$ до $\lambda=0,59$ мкм — темно- и светло-зеленому; от $\lambda=0,58$ до $\lambda=0,63$ мкм — желто-оранжевому; от $\lambda=0,63$ до $\lambda=0,76$ мкм — светло- и темно-красному. Выделение определенных цветов в известной мере ус-

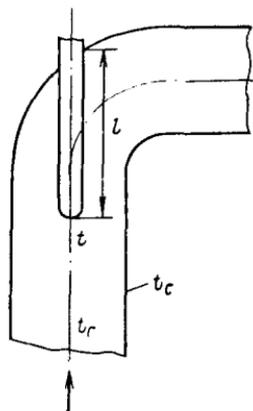


Рис. 6.23. Положение чувствительного элемента измерителя в трубе

ловно, так как в сплошном видимом спектре переход от одного цвета к другому происходит непрерывно.

Волны длиной $\lambda = 0,76$ мкм относятся к невидимым инфракрасным тепловым лучам. По мере повышения температуры нагретого тела и изменения его цвета быстро возрастает спектральная энергетическая яркость (СЭЯ), т. е. излучение определенной длины волны (яркости), а также заметно увеличивается суммарное (интегральное) излучение. Указанные свойства нагретых тел используют для измерения их температуры и в соответствии с этими свойствами пирометры излучения делятся на квазимонохроматические, спектрального отношения и полного излучения.

Теоретически можно обосновать лишь явление лучеиспускания абсолютно черного тела¹, коэффициент лучеиспускания которого принимают за единицу. Все реальные физические тела обладают способностью отражать часть падающих на них лучей, и поэтому коэффициент лучеиспускания их меньше единицы, причем он зависит как от природы данного тела, так и от состояния его поверхности. В природе нет абсолютно черных тел, но есть тела, близкие по своим свойствам к абсолютно черному телу. Так, тело, покрытое черной шероховатой краской (нефтяной сажей), поглощает до 96% всей лучистой энергии.

Свойством абсолютно черного тела обладает также поверхность отверстия в замкнутой полости (топки печей, паровых котлов и др.) с непрозрачными и равномерно нагретыми стенками. Это объясняется тем, что все лучи, попадающие в такое отверстие извне, практически полностью поглощаются внутри тела вследствие многократного отражения от внутренней поверхности.

СЭЯ и интегральное излучение зависят от физических свойств вещества, поэтому шкалы пирометров градуируют по излучению абсолютно черного тела. Возрастание СЭЯ с повышением температуры различно для волн разных длин и в области сравнительно невысоких температур для абсолютно черного тела описываются уравнением Вина

$$E_{0\lambda} = C_1 \lambda^{-5} e^{-\frac{C_2}{\lambda T}}, \quad (6.22)$$

где $E_{0\lambda}$ — СЭЯ абсолютно черного тела для волны длиной λ ; T — абсолютная температура тела; C_1 и C_2 — константы излучения, числовые значения которых зависят от принятой системы единиц; $C_1 = 2\pi^5 h c^2$; h — постоянная Планка; c — скорость света; $C_2 = N h c / R$; N — постоянная Авогадро; R — универсальная газовая постоянная; e — основание натуральных логарифмов.

Уравнением Вина можно пользоваться до температуры примерно 3000 К. При более высоких температурах интенсивность излучения абсолютно черного тела характеризуется уравнением Планка

$$E_{0\lambda} = C_1 \lambda^{-5} \left(e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1 \right)^{-1}. \quad (6.23)$$

Реальные физические тела излучают энергию менее интенсивно, чем абсолютно черное тело. В результате измерения

¹ Тело называется абсолютно черным, если оно поглощает всю падающую на него лучистую энергию.

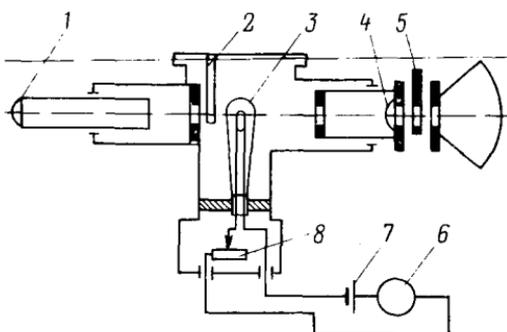


Рис. 6.24. Схема квазимонохроматического пирометра

квазимонохроматическими пирометрами и пирометрами полного излучения получают так называемую условную температуру. Для перехода от условной (яркостной) температуры к истинной используют преобразовательное уравнение Вина.

Квазимонохроматические пирометры. Действие квазимонохроматических (оптических) пирометров основано на сравнении яркости монохроматического излучения двух тел: эталонного и тела, температуру которого измеряют. В качестве эталонного тела обычно используют нить лампы накаливания, яркость излучения которой регулируется.

Наиболее распространенным прибором этой группы является монохроматический оптический пирометр с исчезающей нитью, принципиальная схема которого приведена на рис. 6.24.

Пирометр представляет собой телескопическую трубку с линзой 1 объектива и линзой 4 окуляра. Внутри телескопической трубки в фокусе линзы объектива находится пирометрическая лампа накаливания 3 с подковообразной нитью. Лампа питается от аккумулятора 7 через реостат 8. В цепь питания пирометрической лампы включен милливольтметр 6, конструктивно объединенный с трубкой телескопа. Шкала милливольтметра градуирована в градусах температуры. Для получения монохроматического света окуляр снабжен красным светофильтром 5, пропускающим только лучи определенной длины волны. В объективе находится серый поглощающий светофильтр 2, служащий для расширения пределов измерения.

При подготовке оптической системы к измерению трубки наводят на тело и передвигают объектив до получения четкого, ясного изображения тела и нити лампы (в виде резкой черной подковки). Включив источник тока, реостатом регулируют яркость нити до тех пор, пока средняя часть ее не сольется с освещенным телом. В этот момент по шкале милливольтметра отсчитывают температуру тела.

Приборостроительная промышленность выпускает переносные оптические пирометры с исчезающей нитью в различном конструктивном оформлении для температур от восьмисот до нескольких тысяч градусов. Пирометры работают с эффективной длиной волны $\lambda = 0,65$ или $\lambda = 0,66$ мкм.

Фотоэлектрические пирометры. В этих пирометрах чаще всего используют фотоэлементы с внешним фотоэффектом, в которых возникает электрический ток (фототок), пропорцио-

нальный падающему на него световому потоку или, точнее, пропорциональный энергии излучения волн определенного участка спектра.

Фототок, создаваемый фотоэлементами, может непосредственно служить мерой температуры измеряемого тела. Такие приборы не отличаются высокой точностью. Более совершенны приборы, фотоэлемент которых используется в нулевом режиме как устройство для сравнения двух источников излучения: измеряемого тела и регулируемого источника света.

В фотоэлектрических пирометрах типа ФЭП (рис. 6.25) изображение измеряемого раскаленного тела при помощи объектива 1 и диафрагмы 2 создается в плоскости одного из отверстий диафрагмы 3, расположенной перед фотоэлементом 5. Через другое отверстие диафрагмы 3 фотоэлемент освещается регулируемым источником света — электрической лампой 6. Перед фотоэлементом расположен красный светофильтр 4.

Фотоэлемент поочередно с частотой 50 Гц освещается то измеряемым телом, то лампой. Поочередность освещения создается колеблющейся заслонкой 8 модулятора света 7 вибрационного типа. Оба световых потока, попадающие на фотоэлемент, изменяются в противофазе по синусоидальному закону, что достигается специальным профилированием заслонки и отверстий.

На выходе фотоэлемента возникает фототок, величина которого определяется освещенностью от тела и лампы. При неравенстве этих освещенностей в цепи фотоэлемента возникает переменная фототока, совпадающая по фазе либо с фототоком тела, либо с фототоком от лампы. Переменная составляющая фототока усиливается электронным усилителем 9, имеющим фазочувствительную схему. Выходной сигнал усилителя управляет цепью питания лампы 6. Сила тока накала лампы будет изменяться до тех пор, пока освещенности от измеряемого тела и лампы не уравниваются и переменная составляющая фототока не станет равной нулю. Тем самым сила тока в лампе окажет-

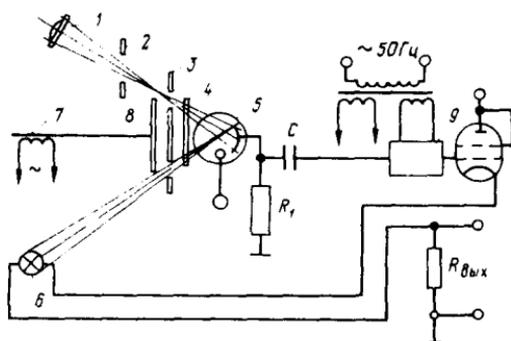


Рис. 6.25. Упрощенная схема фотоэлектрического пирометра типа ФЭП

ся однозначно связанной с яркостной температурой измеряемого тела.

Сила тока, питающего лампу, измеряется быстродействующим автоматическим потенциометром по величине падения напряжения на сопротивлении $R_{\text{вых}}$ в цепи лампы. Потенциометр градуируют в градусах яркостной температуры. При измерениях температуры выше допустимой для лампы θ (1400—1500 °С) вводится ослабляющий светофильтр, что позволяет довести предел измерения до 4000 °С.

Пирометры типа ФЭП выпускаются одношкальными для измерений температур от 600 до 2000 °С или двухшкальными для измерения более высоких температур.

Пирометры спектрального отношения. В пирометрах спектрального отношения (цветовых), применяемых для промышленных измерений, определяется отношение СЭЯ реального тела в лучах с двумя заранее выбранными значениями длины волны. Это отношение для каждой температуры различно, но вполне однозначно.

В большинстве случаев для реальных тел кривые $E_{\lambda}=f(\lambda)$ при различных температурах совершенно подобны кривым для абсолютно черного тела, поэтому практически не требуется вводить поправки на неполноту излучения, что является основным преимуществом цветковых пирометров. Принципиальная схема цветового пирометра с фотоэлементом показана на рис. 6.26.

Измеряемое излучение через защитное стекло 1 и объектив 2 попадает на фотоэлемент 4. Между объективом и фотоэлементом установлен обтюратор 3, вращаемый синхронным двигателем. Обтюратор выполнен в виде диска с двумя отверстиями, одно из которых закрыто красным светофильтром K , другое — синим C . При вращении обтюратора на фотоэлемент попеременно попадают излучения через красный или синий светофильтр. Спектральная характеристика фотоэлемента зависит от температуры, поэтому фотоэлемент в пирометре заключен в термостат с автоматическим регулированием.

Электрический ток, напряжение которого пропорционально соответствующим интенсивностям излучения, предварительно

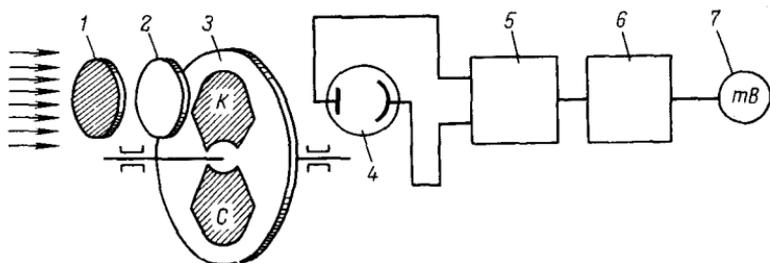


Рис. 6.26. Схема пирометра спектрального отношения

усиливается электронным усилителем 5 и преобразуется специальным электронным логарифмическим устройством 6 в постоянный ток, величина постоянного тока зависит от I/T . Выходной ток логарифмирующего устройства измеряется указывающим или регистрирующим милливольтметром 7. Пределы измерения пирометра от 1400 до 2500 °С; основная погрешность при измерении температуры физических тел не превышает $\pm 1\%$ от верхнего предела измерений.

ГЛАВА 7

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА И СОСТАВА МАТЕРИАЛОВ

7.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

В химической и смежных отраслях промышленности технологические процессы связаны с получением и переработкой многих газообразных и жидких веществ. Эти вещества характеризуются различными показателями, по которым оценивают их качество.

При измерении состава сред объект измерения рассматривают как смесь, состоящую из нескольких (не менее двух) элементов, называемых компонентами. Под измерением состава понимают определение доли (концентрации) того или иного компонента в смеси. При определении концентрации одного компонента (даже если в смеси помимо определяемого компонента присутствует еще несколько) смесь называют бинарной (двойной); когда определяют концентрации нескольких веществ, смесь называют многокомпонентной.

Количественно состав характеризуют отношением количества определяемого компонента к количеству всей взятой пробы и выражают в соответствии с РД 50-160—81 в массовой, объемной и молярной долях, т. е. в отношении массы, объема или количества вещества определяемого компонента соответственно к массе, объему или количеству вещества анализируемой пробы или в массовой и молярной концентрациях (отношениях массы или количества вещества к объему анализируемой пробы).

По ГОСТ 8.417—81 единицы измерения первых трех величин безразмерны: доля (без обозначения), процент (обозначение %), тысячная доля (обозначение русское тыс.⁻¹, латинское *pt*) и миллионная доля (обозначение русское млн.⁻¹, латинское *ppm*); единица измерения массовой концентрации — килограмм на метр кубический (обозначение кг/м³) и дольные от нее единицы: г/м³, мг/м³, г/см³, г/мл; единица молярной концентрации — моли на метр кубический (обозначение русское моль/м³, моль/мл).

Методы анализа состава вещества подразделяют на избирательные и интегральные. Избирательные методы позволяют избирательно (однозначно) получать информацию о количестве конкретного компонента в смеси. В интегральных или неизбирательных методах результаты измерения отражают количество некоторой группы веществ в смеси.

Газоанализатор — прибор, предназначенный для получения информации о значении концентрации измеряемого компонента или суммы компонентов в анализируемой газовой смеси.

Анализируемая смесь — смесь газов и паров, которая должна быть проанализирована, т. е. должен быть определен ее качественный и количественный состав, или же в которой должны быть определены концентрации отдельных ее компонентов.

Измеряемый компонент — один из газов, входящих в газовую смесь, подлежащий количественному определению.

Нулевой газ — газ, который при прохождении через газоанализатор не вызывает отклонения указателя показывающего прибора.

Поверочная газовая смесь (ПГС) — смесь нулевого газа с известным количеством измеряемого компонента, применяемая для градуировки и поверки газоанализатора.

Газоанализаторы, используемые для контроля и регулирования технологических процессов, градуируют в единицах объемной доли, а для высокоточных измерений — в единицах молярной доли. Газоанализаторы, которые применяют для контроля воздушной среды, градуируют в единицах массовой концентрации ($\text{кг}/\text{м}^3$, $\text{мг}/\text{м}^3$, $\text{мг}/\text{л}$).

Предельно допустимая концентрация (ПДК) — концентрация токсичных веществ, содержащихся в воздухе, которая при ежедневном воздействии в течение неограниченно продолжительного времени не может вызвать у работающих профессиональных заболеваний.

7.2. ИЗМЕРЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ РАСТВОРОВ

Для контроля концентрации растворов наиболее широкое применение нашли следующие методы:

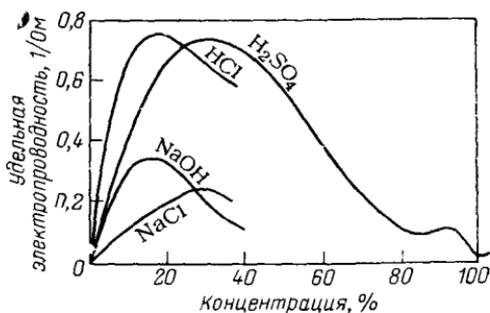
кондуктометрический, основанный на измерении электропроводности электролитов;

оптический, основанный на изменении оптических свойств жидкостей от концентрации определяемого вещества;

электрометрический, основанный на измерении разности потенциалов специальных электродов, погруженных в контролируемую среду, зависящей от ее кислотности или щелочности (рН-метрия).

Кондуктометрический метод. Измерение концентрации растворов электролитов по их электропроводности (кондуктометрия) широко применяют как в лабораторной практике, так и

Рис. 7.1. Зависимости удельной электропроводности электролитов от концентрации



для непрерывного автоматического контроля в промышленных условиях.

При использовании кондуктометрического метода анализа мерой концентрации раствора является электропроводность. Для оценки электропроводности растворов различных веществ Кольрауш ввел понятие эквивалентной электропроводности, которая определяется как электропроводность раствора, содержащего 1 грамм-эквивалент вещества на 1 см³ раствора

$$\lambda = \sigma / \eta, \quad (7.1)$$

где λ — эквивалентная электропроводность раствора; σ — удельная электропроводность раствора, См/см; η — эквивалентная концентрация растворенного вещества, г-экв/см³.

Эквивалентная электропроводность всех электролитов увеличивается по мере разбавления раствора вследствие увеличения диссоциации. Предельного значения она достигает при полной диссоциации (т. е. при бесконечном разбавлении). Зависимость между удельной электропроводностью раствора, природой растворенного электролита и его концентрацией определяется законом Кольрауша

$$\sigma = \alpha \eta (v_k + v_a), \quad (7.2)$$

где v — подвижность ионов (катионов v_k и анионов v_a) при бесконечном разбавлении, т. е. скорость их перемещения в электрическом поле с градиентом напряжения 1 В/см, выраженная в см/с; α — степень электролитической диссоциации.

На рис. 7.1 показана зависимость удельной электропроводности от концентрации, характерная для большинства сильных электролитов. При увеличении концентрации удельная электропроводность раствора сначала быстро возрастает, достигая некоторой максимальной величины, зависящей от природы электролита, а затем уменьшается. Следовательно, для получения однозначной зависимости электропроводности от концентрации необходимо производить измерения в пределах концентраций, расположенных с одной стороны от максимума. Из рассмотрения зависимостей видно, что кривые слева от максимума имеют большую крутизну. Следовательно, в этой области концентраций кондуктометрический метод имеет наибольшую чувствительность. Кроме того, в значительной области измерения концентраций как слева, так и справа от максимума зависимости близки к линейным.

В электродной кондуктометрии применяют измерительные ячейки, состоящие из двух электродов, установленных на определенном расстоянии один от другого в сосуде с контролируемым раствором. Измерительная ячейка (рис. 7.2) характеризуется электрическим сопротивлением (в Ом)

$$R = (l/\sigma) (L/S), \quad (7.3)$$

где S — площадь электродов; L — расстояние между электродами; σ — удельная электрическая проводимость раствора.

В практике кондуктометрических измерений это отношение получило название константы измерительной ячейки K , которую определяют из опыта. Электропроводность можно измерять, используя как постоянный, так и переменный ток промышленной или повышенной частоты.

Большинство отечественных промышленных кондуктометров работают на токе промышленной частоты. Наряду с двухэлектродной измерительной ячейкой, которую применяют в большинстве кондуктометрических концентратометров, используют ячейки с четырьмя электродами (рис. 7.3). В этой ячейке два электрода являются токовыми, к ним подводится напряжение от внешнего источника, и между ними через раствор протекает ток. Два других электрода представляют собой потенциометрические зонды, которыми измеряется падение напряжения в определенном объеме контролируемого раствора. Падение напряжения пропорционально сопротивлению контролируемого раствора, т. е. его концентрации. Использование такой ячейки и компенсационного метода измерения напряжения позволяет почти полностью избавиться от влияния поляризации на получаемые результаты и практически устранить возникновение емкостной составляющей при измерении. Это обусловлено тем, что индикаторные электроды освобождены от токовой нагрузки, и все связанные с ней побочные электрохимические процессы происходят на токовых электродах.

При использовании четырехэлектродной ячейки в качестве измерительных приборов служат серийные автоматические по-

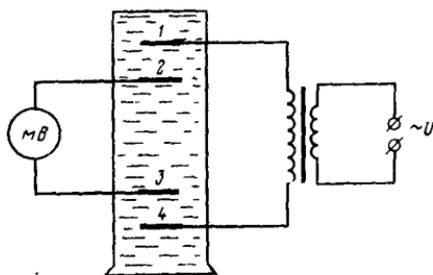
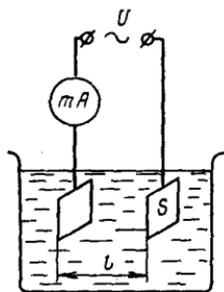
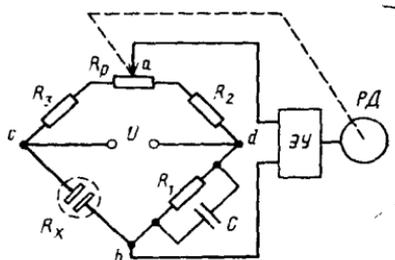


Рис. 7.2. Двухэлектродная измерительная ячейка

Рис. 7.3. Четырехэлектродная измерительная ячейка

Рис. 7.4. Схема кондуктометра с уравновешенной мостовой измерительной схемой



тенциометры. Схема кондуктометра с использованием уравновешенной мостовой измерительной схемы показана на рис. 7.4.

В два смежных плеча моста включены постоянное сопротивление R_1 и сопротивление измерительной ячейки R_x . В два других плеча, наряду с постоянными сопротивлениями R_2 и R_3 включен реохорд R_p для уравновешивания моста. Напряжение с диагонали моста ab подается на вход электронного усилителя $ЭУ$, выполняющего функции нуль-индикатора. Если мостовая схема находится в равновесии, сигнал на входе электронного усилителя равен нулю, и включенный на его выходе реверсивный двигатель $РД$ остается неподвижным. При изменении концентрации контролируемого раствора изменяется сопротивление измерительной ячейки R_x , и мост разбалансируется. Сигнал разбаланса, пропорциональный изменению концентрации, поступает на вход усилителя $ЭУ$ и после усиления — на реверсивный двигатель. Двигатель перемещает движок реохорда до наступления нового состояния равновесия мостовой схемы.

При изменении температуры электролита изменяется на 1,5—2,5% его удельная электропроводность. Температура большинства технологических растворов изменяется довольно в значительных пределах, поэтому все промышленные кондуктометрические концентратометры имеют автоматические компенсаторы влияния температуры контролируемых растворов на результаты измерений.

В химической промышленности применяют кондуктометры, имеющие автоматические температурные компенсаторы электрического типа (рис. 7.5).

Для компенсации температурной погрешности необходимо обеспечить равенство температурных коэффициентов сопротивления измерительной ячейки R_x и термометра сопротивления R_t . Для этого параллельно R_x включается шунтовое сопротивление R_w с низким температурным коэффициентом (например, из марганца). Поэтому температурный коэффициент раствора приближается к температурному коэффициенту термометра сопротивления R_t , но

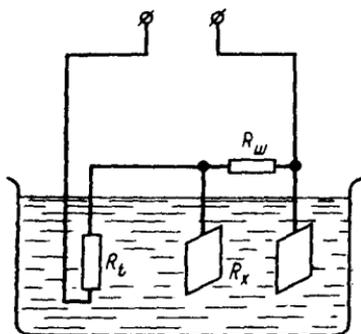
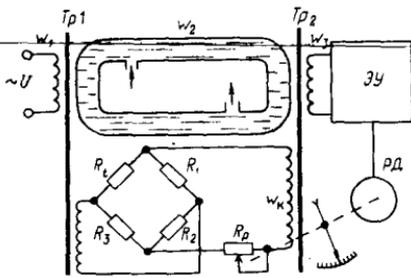


Рис. 7.5. Схема кондуктометрической измерительной схемы с электрическим компенсатором

Рис. 7.6. Схема бесконтактного низкочастотного кондуктометра



имеет противоположный знак. Таким образом, общее сопротивление всей цепи почти не изменяется при колебаниях температуры контролируемого раствора, так как изменение

сопротивления цепи $R_x - R_{ш}$ компенсируется равным по величине и обратным по знаку изменением сопротивления R_1 .

Бесконтактная электрокондуктометрия. В зависимости от частоты питающего напряжения бесконтактная кондуктометрия подразделяется на низкочастотную (промышленной и звуковой частоты до 1000 Гц) и высокочастотную (частоты до сотен мегагерц). Физическая основа низкочастотной бесконтактной кондуктометрии заключается в следующем (рис. 7.6).

Труба из диэлектрика образует замкнутый виток, который заполнен контролируемым раствором электролита. Снаружи на трубу намотаны обмотки двух трансформаторов — возбуждающего $Tr 1$ и измерительного $Tr 2$. Первичная обмотка трансформатора $Tr 1$ присоединена к источнику переменного тока U . Замкнутый жидкостный виток, образованный раствором электролита в трубе, выполняет функцию вторичной обмотки трансформатора $Tr 1$. В результате электромагнитного взаимодействия в жидкостном витке индуцируется э. д. с.

$$E_p = (\omega_1/\omega_2) U, \quad (7.4)$$

где ω_1 — число витков первичной обмотки трансформатора $Tr 1$; ω_2 — число витков вторичной обмотки (жидкости); обычно $\omega_2 = 1$; U — напряжение, питающее первичную обмотку.

Сила тока, протекающего в жидкости под действием э. д. с.

$$I_p = E_p / R_p = E_p \chi k_p = \omega_1 U / \omega_2 k_p, \quad (7.5)$$

где R_p — сопротивление жидкостного витка; k_p — константа низкочастотной бесконтактной кондуктометрической ячейки, равная отношению длины жидкостного витка к площади его проводящего сечения; χ — электрическая проводимость раствора.

Обычно величину k_p определяют экспериментально. В правой части уравнения (7.5) все величины, кроме χ , постоянны. Поэтому сила тока I_p пропорциональна концентрации контролируемого раствора.

Сила тока I_p измеряется вторым трансформатором $Tr 2$, для которого жидкостный виток является первичной обмоткой. Величина э. д. с. $E_{изм}$, наводимая во вторичной обмотке измерительного трансформатора $Tr 2$, пропорциональна концентрации. В большинстве случаев ее измеряют компенсационным методом, для этого служит дополнительная обмотка w_k трансфор-

матора $Tp 2$, ампервитки которой вычитаются из ампервитков раствора.

Условие компенсации

$$I_k \omega_k = I_p \omega_2. \quad (7.6)$$

Поскольку $\omega_1 = 1$, $I_k = I_p \omega_k$.

Для измерения силы тока, протекающего через компенсационную обмотку, используют реверсивный двигатель РД, который перемещает движок R_p . Положение движка реохорда и связанной с ним стрелки прибора пропорционально концентрации контролируемого раствора. Для компенсации температурной погрешности измерений предназначен термометр сопротивления R_t , который включен в мостовую корректирующую схему и находится в контролируемом растворе.

Бесконтактные низкочастотные кондуктометры применяют для контроля концентрации электролитов при удельной электропроводности последних в пределах $1-10^{-6}$ См/см.

Метод бесконтактной высокочастотной кондуктометрии основан на взаимодействии электромагнитного поля высокой частоты с анализируемым электролитом, находящимся в измерительной ячейке емкостного или индуктивного типа (рис. 7.7). В результате этого взаимодействия изменяется импеданс ячейки, который функционально связан с электрической проводимостью κ и диэлектрической проницаемостью ϵ анализируемого раствора.

По конструктивному исполнению ячейки подразделяются на проточные и погружные. Высокочастотные кондуктометры являются приборами косвенного типа, поскольку они служат для относительных измерений электрической проводимости, т. е. измеряется не электрическая проводимость, а один из электрических параметров ячейки, функционально связанный с электрической проводимостью контролируемого электролита.

Оптические методы. Эти методы анализа растворов нашли широкое применение в химической промышленности. Они универсальны и высокочувствительны. Из большого числа оптических методов рассмотрим лишь основные.

Колориметрический метод количественного анализа основан на свойстве окрашенных растворов неодинаково поглощать проходящий через них поток света. Количественные соотношения определяются законом Ламберта — Бера.

Фотоэлектрические колориметры предназначены для работы в видимом участке

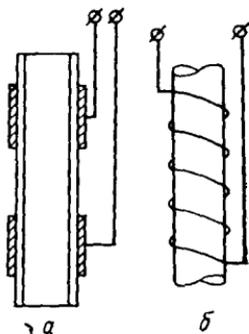


Рис. 7.7. Измерительные ячейки высокочастотных кондуктометров:

а — емкостная; б — индуктивная

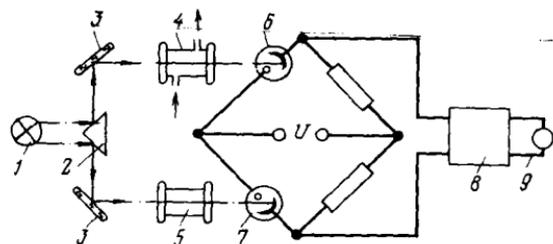


Рис. 7.8. Принципиальная схема фотокалориметра: 1 — лампа; 2 — призма; 3 — зеркало; 4 — рабочая кювета; 5 — сравнительная кювета; 6, 7 — фотоэлементы; 8 — усилитель; 9 — вторичный прибор

спектра. Концентрация измеряется по интенсивности окраски анализируемого вещества, отсюда и название приборов («колор» — цвет). Чтобы увеличить чувствительность и избирательность измерений, в фотокалориметрах широко применяют светофильтры. Для регистрации интенсивности световых потоков в фотоэлектрических колориметрах в качестве приемников используют фотоэлементы, фотосопротивления и фотоумножители различных типов.

В автоматических фотокалориметрах обычно применяют двухканальные (дифференциальные) схемы. Эти схемы не чувствительны к колебаниям источника света, внешней освещенности и температуры, так как измерения производятся сравнительным методом. В двухканальных фотокалориметрах (рис. 7.8) сравниваются величины фототоков двух фотоэлементов, один из которых (токов) пропорционален прошедшему через контролируемый раствор световому потоку, а другой — световому потоку, прошедшему через эталонный раствор.

При равенстве оптических свойств эталонной и исследуемой жидкостей освещенность обоих фотоэлементов одинакова и ток в диагонали моста отсутствует. Если концентрация исследуемой жидкости отличается от эталонной (слабее или сильнее окрашена), то в диагонали моста появляется ток, величина которого функционально зависит от концентрации.

Рефрактометрический метод использует зависимость коэффициента преломления света, проходящего из воздуха в контролируемую среду, от концентрации анализируемого компонента в последней. Для растворов одной природы различных концентраций справедлива зависимость

$$C_x = C_a (n_x - n_a) / (n_a - n_0), \quad (7.7)$$

где C_x и C_a — концентрации контролируемого и эталонного растворов; n_x и n_a — показатели преломления растворов; n_0 — показатель преломления растворителя.

Существует несколько методов определения показателя преломления, основными из которых являются спектрометрический и метод полного внутреннего отражения.

Спектрометрический метод основан на определении показателя преломления по углу наименьшего отклонения светового потока в стеклянных призмах, заполненных контролируемым раствором. На рис. 7.9 показана принципиальная схема авто-

матического рефрактометра, в котором использована кювета дифференциального типа. Луч от источника света 1 проходит через конденсорную линзу 2, диафрагму 3 и попадает в кювету 4. Если концентрация контролируемого раствора равна концентрации сравнительного раствора, то луч проходит через кювету без отклонения и равномерно освещает оба фотосопротивления Φ_1 и Φ_2 . При этом сигнал на выходе равен нулю. При изменении концентрации анализируемого раствора луч света отклоняется в ту или иную сторону, и равенство освещенностей фотосопротивлений нарушается. В результате этого на вход электронного усилителя ЭУ подается сигнал, знак и величина которого определяются отклонением концентрации контролируемого раствора от концентрации сравнительного раствора. Этот сигнал усиливается в ЭУ и приводит во вращение реверсивный двигатель РД, который через систему передач поворачивает компенсационную пластину 5 до тех пор, пока равенство освещенностей не восстановится. При этом угол поворота пластины и связанной с ней отсчетной системы 6 прибора пропорционален изменению концентрации контролируемого раствора. Изменяя толщину пластины 5, можно изменять пределы измерения прибора.

Кювета 4, состоящая из двух камер, автоматически обеспечивает температурную компенсацию результатов измерения, если сравнительная (эталонная) жидкость имеет тот же температурный коэффициент показателя преломления, что и контролируемая.

Поляриметрический метод. Этот метод определения концентрации основан на свойстве некоторых оптических активных веществ вращать плоскость поляризации проходящего через них поляризованного света.

Для растворов, содержащих оптически активные вещества, угол вращения плоскости поляризации пропорционален концентрации при постоянной толщине слоя раствора.

$$\alpha = \alpha_0 l C, \quad (7.8)$$

где α_0 — удельное вращение плоскости поляризации, зависящее от температуры и длины волны поляризованного света.

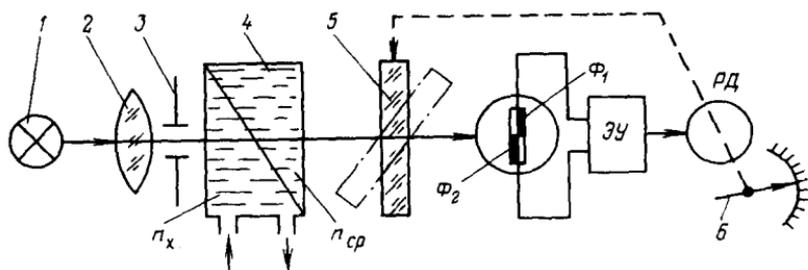


Рис. 7.9. Принципиальная схема автоматического рефрактометра

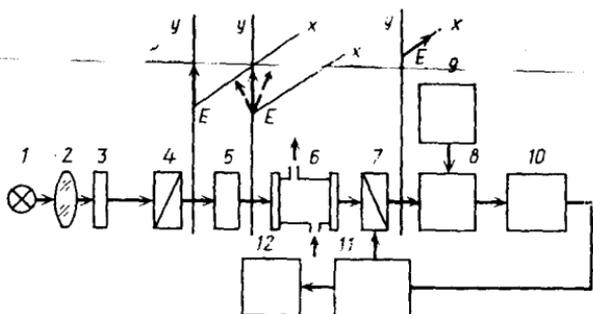


Рис. 7.10. Принципиальная схема автоматического поляриметра

Таким образом, зная величину α_0 , по измеренному значению угла вращения можно определить концентрацию C .

На рис. 7.10 показана принципиальная схема автоматического поляриметра. Обозначение $\uparrow E$ выражает состояние поляризации в разных точках оптической системы в положении баланса.

Излучение от источника света 1, сформированное линзой 2 в пучок, близкий к параллельному, пройдя интерференционный фильтр 3, становится монохроматическим. Поляризатор 4 превращает это излучение в линейно поляризованное с определенным азимутом. Модулятор 5 (например, ячейка Фарадея) изменяет азимут поляризации с частотой f на одинаковую величину от среднего положения. Анализатор 7 установлен в скрещенное положение, т. е. под углом 90° к среднему положению азимута поляризации, и на фотоприемник 8 поступает излучение с амплитудной модуляцией удвоенной частоты ($2f$) изменения азимута поляризации. Фотоприемник преобразует излучение в электрический сигнал. Питание фотоприемника осуществляет блок питания 9.

Если между модулятором и анализатором поместить оптически активный объект 6, то среднее положение азимута поляризации будет повернуто на определенный угол α , и на фотоприемник поступит излучение частоты f . Электрический сигнал частоты вызовет в электронной системе 10 сигнал рассогласования, который поступит в исполнительный механизм 11, имеющий жесткую связь с анализатором. В зависимости от фазы сигнала рассогласования исполнительный механизм будет поворачивать анализатор в ту или иную сторону вокруг оптической оси системы. Это будет продолжаться до тех пор, пока вновь не установится скрещенное положение и частота излучения за анализатором не станет равна $2f$. Угол поворота анализатора равен углу вращения азимута поляризации оптически активным объектом. Результат измерения виден на отсчетном устройстве 12, связанном с анализатором через исполнительный механизм. Поляризационно-оптические методы практически безынерционны и обладают высокой точностью.

7.3. ИЗМЕРЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ВОДОРОДНЫХ ИОНОВ В РАСТВОРАХ (рН-МЕТРИЯ)

Кислотность и щелочность любых водных растворов кислот и щелочей можно выразить в функции концентрации водородных ионов. Концентрацию водородных ионов определяют по величине потенциала, возникающего на границе различных электродов, опущенных в раствор. Даже в самой чистой воде всегда имеются водородные и гидроксильные ионы, что определяет электропроводность чистой воды.

Так как распад молекул воды на ионы незначителен, концентрацию водородных ионов можно считать постоянной. Поэтому

$$[\text{H}^+][\text{OH}^-] = k[\text{H}_2\text{O}] = k_{\text{H}_2\text{O}} = \text{const.}$$

Опытами установлено, что при $t = 22^\circ\text{C}$ константа диссоциации $k_{\text{H}_2\text{O}} = 10^{-14}$, т. е. для чистой воды и любых нейтральных растворов (в кмоль/л)

$$[\text{H}^+] = [\text{OH}^-] = \sqrt{10^{-14}} = 10^{-7}. \quad (7.9)$$

При растворении в воде кислоты концентрация H^+ увеличивается, а концентрация OH^- становится соответственно меньше, чем в нейтральном растворе. При растворении щелочей, наоборот, увеличивается концентрация OH^- и уменьшается содержание H^+ . Поэтому в кислотных растворах $\text{H}^+ > 10^{-7}$, а в щелочных $\text{H}^+ < 10^{-7}$.

На практике концентрацию водородных ионов численно принято характеризовать отрицательным логарифмом концентрации H^+ , так называемым водородным показателем рН

$$\text{pH} = -\lg[\text{H}^+]. \quad (7.10)$$

При этом нейтральная реакция раствора соответствует $\text{pH} = 7$, кислая $\text{pH} < 7$, а щелочная $\text{pH} > 7$ (от $\text{pH} = 7$ до $\text{pH} = 14$). Число рН можно определить двумя методами: колориметрическим и электрометрическим.

Колориметрический метод основан на свойствах некоторых органических красителей изменять свой цвет в зависимости от концентрации водородных ионов. Этот метод применяют главным образом в лабораторной практике.

Потенциометрический метод основан на измерении разности электрических потенциалов двух специальных электродов, помещенных в испытуемый раствор, причем один электрод — сравнительный — в процессе измерений имеет постоянный потенциал. При электрическом соединении измерительного и сравнительного электродов образуется гальванический элемент, по величине э. д. с. которого можно судить о величине рН раствора.

Поскольку абсолютную величину электродного потенциала практически определить нельзя, измеряют его относительное

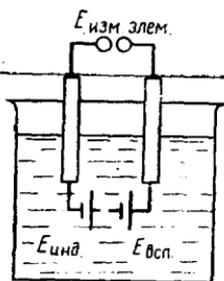


Рис. 7.11. Измерительная ячейка pH-метра

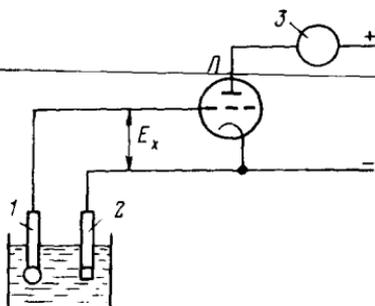


Рис. 7.12. Принципиальная схема pH-метра

значение, для этого составляют гальванический элемент из измерительного (индикаторного) электрода, анализируемой среды и вспомогательного электрода. В отличие от индикаторного электрода, потенциал которого функционально связан с активностью контролируемых ионов, потенциал вспомогательного электрода должен оставаться постоянным.

При соединении внешней цепью индикаторного и вспомогательного электродов, погруженных в контролируемый раствор, образуется гальванический элемент, именуемый в дальнейшем измерительным элементом для потенциометрических измерений. Схема его приведена на рис. 7.11. В практике измерений обычно используют стеклянный (измерительный) и каломельный сравнительный электроды.

Современные pH-метры представляют собой в основном автоматические приборы с непосредственным отсчетом, шкалы которых отградуированы в единицах pH. Простейшая принципиальная схема такого pH-метра показана на рис. 7.12. Э. д. с. измерительной ячейки (электроды 1 и 2) E_x подается на вход электронного усилителя и управляет силой тока в анодной цепи лампы L , которая измеряется амперметром 3. Шкала прибора отградуирована в единицах pH. Входным сопротивлением в этом случае является сопротивление участка сетка — катод лампы, которое определяется величиной сеточного тока. В качестве входного каскада применяют специальные электрометрические лампы.

7.4. ИЗМЕРЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ЖИДКОСТЕЙ

Плотность является одним из параметров, характеризующих качество получаемой продукции. Плотностью называется отношение массы тела к его объему

$$\rho = m/V,$$

где m и V — соответственно масса и объем тела.

Единицей плотности в Международной системе единиц (СИ) является кг/м^3 . Плотность жидкостей зависит от температуры. Эта зависимость приблизительно выражается формулой

$$\rho_t = \rho_{t'} [1 - \beta(t - t')], \quad (7.11)$$

где ρ_t — плотность жидкости при рабочей температуре; $\rho_{t'}$ — плотность жидкости при некоторой температуре, отличной от рабочей; β — средний коэффициент объемного теплового расширения жидкости в интервале температур от t до t' .

Принято указывать плотность жидкостей при нормальной температуре (20°C). Эту плотность подсчитывают по формуле

$$\rho_{20} = \rho_t [1 - \beta(20 - t)]. \quad (7.12)$$

Наибольшее применение из плотномеров для измерения плотности жидкостей получили поплавковые, массовые, гидростатические и радиоизотопные.

Поплавковые плотномеры. Работа поплавковых плотномеров основана на законе Архимеда. Поплавковые плотномеры подразделяют на приборы с плавающим и погруженным в жидкость поплавком.

На рис. 7.13 показана принципиальная схема плотнера с плавающим поплавком. Плотномер состоит из основного сосуда 1, в котором плавает металлический поплавок 2. Жидкость по входной трубе 6 поступает в переливной сосуд постоянного напора 5 и далее по трубе 7 — в основной сосуд тоже с переливным устройством. Избыточная жидкость стекает по отводящей трубе 9. На выходном конце подводящей трубы 7 имеются отражательные пластины (на рисунке не показаны), предохраняющие поплавок от завихрений в потоке жидкости. Скорость потока устанавливают при помощи диафрагмы на трубе 7, а также взаимным смещением по вертикали сосудов 1 и 5. Изменение плотности жидкости вызывает перемещение поплавка и связанного с ним сердечника 3 (в первичных катушках 4 индукционного моста 11).

Таким образом, различной плотности измеряемой жидкости соответствует разная глубина погружения поплавка, а следовательно, и положение сердечника в индукционных катушках электрического преобразователя, которое приводит к изменению сигнала, пе-

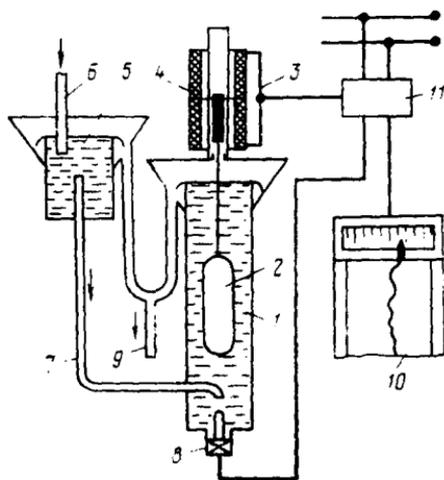


Рис. 7.13. Плотномер с плавающим поплавком

редаваемого на вторичный прибор. Вторичный прибор 10 (показывающий или регистрирующий) градуируется в единицах плотности. Температурная компенсация осуществляется термометром сопротивления 8, включенным в мостовую схему. Погрешность плотномеров с плавающим поплавком составляет порядка $\pm 1\%$.

Массовые плотномеры. Действие массовых плотномеров основано на том, что масса жидкости при неизменном ее объеме прямо пропорциональна плотности.

Массовые плотномеры используют обычно для измерения плотности суспензий и жидкостей, содержащих твердые включения. На рис. 7.14 приведена одна из схем массового плотнера с пневматическим преобразователем, в котором используется принцип уравнивания.

Исследуемая жидкость поступает в прибор по трубе 1 и выходит по трубе 2. Входная и выходная трубы через гибкие резиновые патрубки или металлические сильфоны 3 соединены с петлеобразной трубой 4 из нержавеющей стали. Для чистки петли предусмотрено съемное колено 5.

Петлеобразная труба укреплена в вилке, которая может свободно поворачиваться на оси скобы 6. Петля тягой 7 соединена с рычагом 10, который поворачивается на оси 11. На правом плече рычага помещены противовес 12, уравнивающий систему, когда петля заполнена водой, и тяга 15, связанная с сильфоном обратной связи 16 пневматического преобразователя.

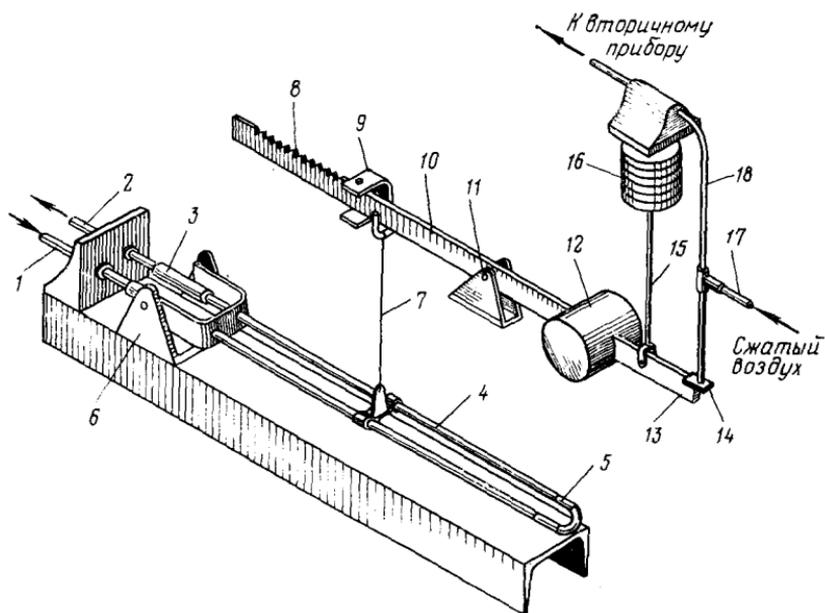


Рис. 7.14. Массовый плотномер

В пневматический преобразователь по трубке 17 непрерывно поступает сжатый воздух под давлением 140 кПа, который, пройдя через дроссель, выходит через зазор между соплом 13 и заслонкой 14. Одновременно воздух заполняет полость сильфона обратной связи и трубку 18, идущую к манометру. Рычаг 10 находится в равновесии, когда по петле протекает жидкость плотностью 1 г/см³. При плотности, превышающей 1 г/см³, вес петли увеличивается, рычаг 10 поворачивается против часовой стрелки, зазор между соплом и заслонкой уменьшается, давление воздуха в преобразователе увеличивается, сильфон растягивается и, воздействуя на тягу 15, опускает правый конец рычага до тех пор, пока не восстановится его равновесное положение.

Ход рычага ограничен упорами 9. Пределы измерения регулируются при помощи дополнительных грузов, навешиваемых на надрезы 8. Давление воздуха в сильфоне, изменяющееся пропорционально изменению плотности жидкости, измеряется вторичным прибором, шкала которого проградуирована в единицах плотности. Прибор измеряет плотность жидкости при фактической ее температуре.

Гидростатические плотномеры. Принцип действия гидростатических плотномеров основан на том, что давление P в жидкости на некоторой глубине H от поверхности равно весу столба жидкости высотой H , т. е.

$$P = H\rho g, \quad (7.13)$$

где ρ — плотность жидкости; g — ускорение свободного падения.

Из формулы (7.13) следует, что давление столба жидкости постоянной высоты H является мерой плотности жидкости.

Давление столба жидкости может быть непосредственно измерено, например, мембранным манометром, если его чувствительный элемент поместить в нижнюю часть сосуда (с постоянным уровнем), через который протекает исследуемая жидкость. Чтобы исключить влияние колебаний уровня жидкости на точность измерений, применяют дифференциальный метод, в соответствии с которым измеряют разность давлений двух столбов жидкости разной высоты.

На основании выражения (7.13) можно записать

$$P_1 - P_2 = \rho g (H_1 - H_2), \quad (7.14)$$

где P_1 и P_2 — давления столбов жидкости; H_1 и H_2 — соответственно высоты столбов жидкости или

$$\Delta P = \rho g \Delta H. \quad (7.15)$$

Отсюда следует, что перепад давления жидкости в двух горизонтальных слоях, расстояние между которыми ΔH остается постоянным, является мерой плотности жидкости.

На рис. 7.15 показана схема гидростатического плотномера типа ДМП. Контролируемая жидкость непрерывно протекает

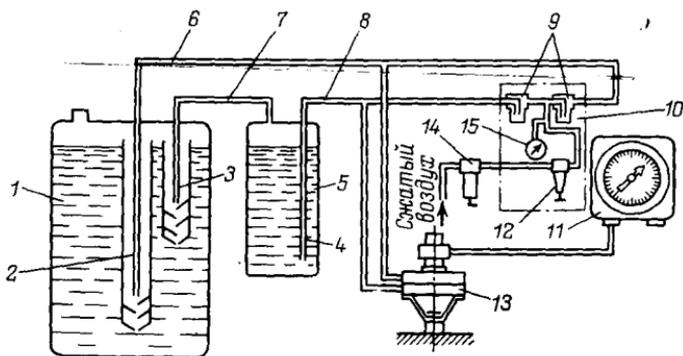


Рис. 7.15. Гидростатический плотномер типа ДМП

через сосуд 1, уровень в котором постоянен. Сосуд 5 заполнен сравнительной жидкостью с известной плотностью до постоянного уровня. Сжатый воздух через фильтр 14 и редуктор 12, блока 10, состоящего из контрольных стаканчиков 9 и манометра 15, подается в трубки. По линии 6 воздух поступает в трубку 2 и, проходя через жидкость, уходит далее в атмосферу. По линии 8 воздух сначала поступает в трубку 4, проходит через жидкость сосуда 5, а затем поступает в трубки 7 и 3. Перепад давлений, образующийся в трубках, измеряется дифманометром 13 с пневматическим преобразователем. Пневматический сигнал направляется на вторичный прибор 11.

Разновидностью гидростатических плотномеров являются пружинные преобразователи плотности, в которых изменение плотности измеряемой среды вызывает деформацию упругих элементов, помещенных в контролируемую жидкость. На рис. 7.16 показана принципиальная схема сифонного преобразователя плотности типа ПЖС-П.

Внутри измерительной камеры на некотором расстоянии один от другого помещены сифоны 11 и 14, соединенные между собой коромыслом 13. При изменении плотности жидкости внутри измерительной камеры изменяется деформация сифонов, и коромысло поворачивается относительно своей точки опоры. Коромысло

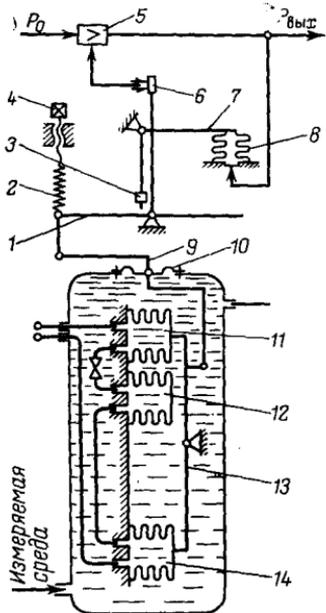


Рис. 7.16. Сифонный преобразователь плотности:

1, 7, 9 — рычаги; 2 — пружина; 3 — наездник; 4 — устройство для регулировки нуля; 5 — усилитель; 6 — элемент сопло-заслонка; 8, 11, 12, 14 — сифоны; 10 — мембрана; 13 — коромысло

13 угловым рычагом 9 соединено с Т-образным рычагом 1 унифицированного пневмопреобразователя. Герметичность вывода рычага 9 обеспечивается мембраной 10. Конструкция вывода предусматривает возможность поворота рычага 9.

Внутренние полости сильфонов 11 и 14, а также сильфона 12, предназначенного для компенсации погрешности, вызываемой изменением температуры измеряемой жидкости, последовательно соединены трубкой с вентилем. Сильфоны заполнены контролируемой жидкостью, плотность которой минимальна. Плотномер ПЖС-П позволяет измерять плотность в интервале 500—2500 кг/м³.

Радиоизотопные плотномеры. Изменение плотности радиоизотопными приборами основано на определении изменений интенсивности пучка γ -лучей после прохождения их через измеряемую среду.

На рис. 7.17 показана принципиальная блок-схема радиоизотопного плотномера жидкости (типа ПЖР-2).

В технологическом трубопроводе установлены источник радиоактивного излучения 1 (Co^{60} , Ci^{137}) и приемник излучения 3; γ -лучи от источника 1 проходят через стенки сосуда 2 и слой жидкости, а затем попадают в приемник излучения 3. Электрический сигнал приемника, являющийся функцией измеряемой плотности, формируется блоком 4 и передается на вход электронного усилителя-преобразователя 5, куда поступает также сигнал от дополнительного устройства. Дополнительное устройство включает в себя радиоизотопный источник излучения 9, металлический клин 10, приемник излучения 11 и формирующий блок 12. Источник и приемник излучения дополнительного устройства такие же, как в первичном преобразователе

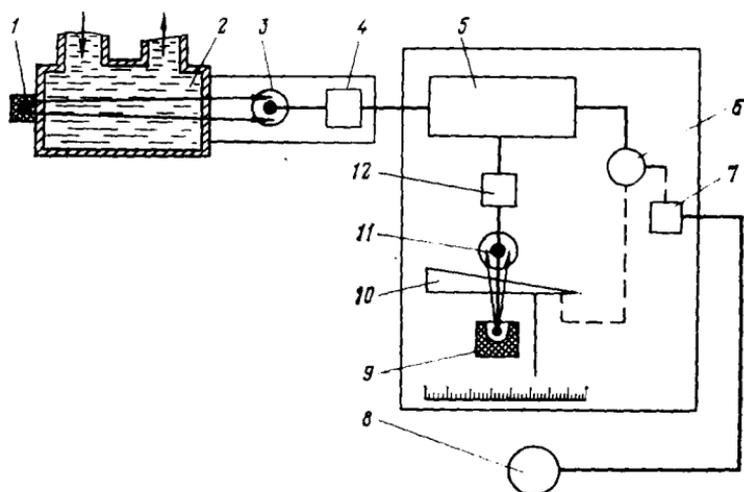


Рис. 7.17. Блок-схема радиоизотопного плотномера

ле. Разность сигналов усиливается в усилителе-преобразователе и подается на реверсивный двигатель 6, который связан с металлическим клином 10 и сердечником дифференциально-трансформаторного преобразователя 7 вторичного прибора 8.

В зависимости от величины и знака сигнала в усилителе-преобразователе реверсивный двигатель перемещает металлический клин до тех пор, пока разность сигналов не станет равной нулю. Величина перемещения клина пропорциональна изменению плотности жидкости. Интервал измеряемой плотности 600—2000 кг/м³; погрешность прибора $\pm 2\%$.

7.5. ИЗМЕРЕНИЕ ВЛАЖНОСТИ ГАЗОВ И ТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ

Содержание влаги в любом теле характеризуется его абсолютной или относительной влажностью. Под абсолютной влажностью газа понимают массу водяного пара в 1,0 м³ газовой смеси при нормальных условиях. Абсолютная влажность измеряется в г/м³ (сух.) и г/м³ (вл.).

Под относительной влажностью ϕ газа понимают отношение массы (объема) водяного пара, заключающегося в 1,0 м³ смеси, к максимально возможной массе (объему) водяного пара в 1,0 м³ при той же температуре. Относительная влажность — величина безразмерная, иногда ее выражают в процентах.

Под влажностью W твердых тел понимают отношение массы влаги, содержащейся в теле, к массе влажного материала. Отношение же массы влаги в теле к массе абсолютно сухого материала называют влагосодержанием.

К наиболее известным и применяемым методам измерения влажности газов относятся:

психрометрический метод, основанный на психрометрическом эффекте, т. е. на зависимости скорости испарения влаги в окружающую среду от влажности этой среды;

метод точки росы, заключающийся в определении температуры, до которой необходимо охладить (при неизменном давлении) насыщенный газ для того, чтобы довести его до состояния насыщения;

сорбционный метод, основанный на поглощении влаги из анализируемой среды каким-либо гигроскопичным веществом;

кондуктометрический метод основан на зависимости электрических свойств материалов от влагосодержания;

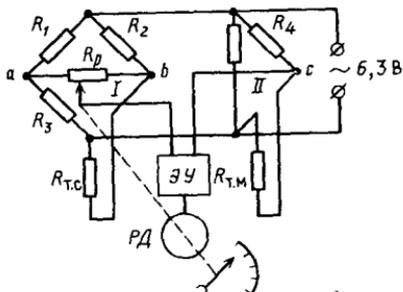
спектрометрический метод использует зависимость поглощения излучений от влажности исследуемого газа;

электрохимический метод (метод К. Фишера) основан на измерении электрического потенциала, возникающего в специальном растворе (растворе Фишера);

метод теплопроводности основан на различии теплопроводностей сухого и влажного газа.

Наибольшее применение получили первые три метода.

Рис. 7.18. Принципиальная схема электрического психрометра



Психрометрический метод.

Основой метода является взаимосвязь между нормальным давлением (упругостью) водяного пара и разностью показаний сухого термометра t_c и термометра, поверхность которого смачивается водой t_m (мокрый термометр). Разность между показаниями сухого и мокрого термометров называется *психрометрической разностью*.

Относительная влажность в зависимости от психрометрической разности $t_c - t_m$ выражается зависимостью

$$\varphi = [P_B - A(t_c - t_m)]/P_C, \quad (7.16)$$

где P_B — упругость паров, насыщающих испытуемую среду при температуре t_m влажного термометра; P_C — упругость паров, насыщающих испытуемую среду при температуре t_c сухого термометра; A — психрометрический коэффициент, зависящий от конструкции психрометра, скорости обдувания влажного термометра газом и давления газа; определяется по справочным психрометрическим таблицам, составленным для определенных конструкций психрометров.

На рис. 7.18 показана принципиальная схема электрического психрометра с термометрами сопротивления. Измерительная часть прибора состоит из двух мостов I и II. Оба моста питаются переменным током от обмотки силового трансформатора электронного усилителя и имеют оба общих плеча R_1 и R_2 . Сухой термометр сопротивления $R_{т.с}$ включен в плечо моста I, мокрый $R_{т.м}$ — в плечо моста II. Мост I образован постоянными резисторами R_1 , R_2 , R_3 и $R_{т.м}$.

Напряжение между точками a и b моста I пропорционально температуре сухого термометра сопротивления, а напряжение между точками a и c — температуре мокрого термометра сопротивления. Величина напряжения между точками b и c пропорциональна разности температур сухого и мокрого термометров. Равновесие измерительной схемы устанавливается автоматически изменением положения движка R_p , приводимого в движение двигателем $РД$. Шкала прибора отградуирована в единицах измерения относительной влажности (%). Класс точности 3,0.

Метод точки росы. При автоматическом контроле влажности газа этим методом точка росы определяется по ослаблению светового потока, отраженного от зеркала и воспринимаемого фотоэлементом. Влагомеры, работающие на основе метода точки росы, называют также гигрометрами.

На рис. 7.19 показана принципиальная схема конденсационного гигрометра точки росы. Охладителем является полупроводниковая термоэлектрическая батарея $ПТ$, работающая

на принципе эффекта Пельтье: при прохождении тока в термоэлектрической цепи температура одного спая повышается, другого спая понижается. К холодному спаю полупроводникового термоэлемента припаяно металлическое зеркало 3. Сила тока, проходящего через термоэлемент, регулируется переменным сопротивлением 4. Для измерения температуры металлического зеркала к его поверхности припаян полупроводниковый термоэлектродпреобразователь T , подключенный к милливольтметру со шкалой, градуированной в единицах абсолютной влажности.

Работает гигрометр следующим образом. В отсутствие на поверхности зеркала конденсата падающий на него от осветителя 1 световой поток отражается и попадает на фотоэлемент 5. В цепи фотоэлемента течет фототок, поэтому к сетке одной электронной лампы подается отрицательное, а к другой — положительное напряжение. Уменьшение силы анодного тока в цепи одной из ламп и увеличение ее в цепи другой приводит к тому, что якорь поляризованного реле занимает положение I. При этом через термоэлемент $ПТ$ проходит ток, и зеркало охлаждается.

Появление конденсата на поверхности зеркала приводит к рассеянию светового потока, а следовательно, и к уменьшению освещенности фотоэлемента. Это вызывает переключение контактов поляризованного реле в положение II, при котором питание термоэлемента отключается. Так как окружающая температура выше температуры зеркала, конденсат с поверхности зеркала быстро испаряется; реле вновь включает в работу термоэлемент.

Для подогрева зеркала предусмотрено питание термоэлемента током обратного направления от батареи Б при помощи ручного переключателя П. Поверхность зеркала обдувается вентилятором 2.

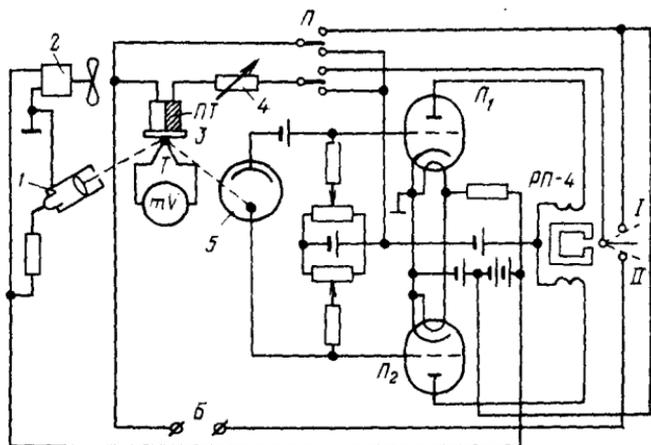
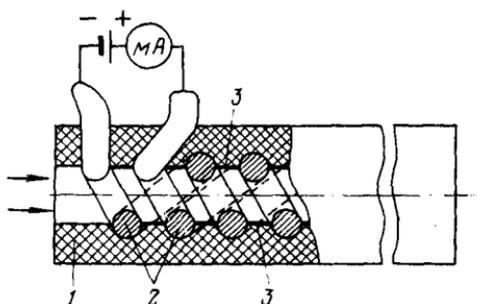


Рис. 7.19. Принципиальная схема конденсационного гигрометра

Рис. 7.20. Принципиальная схема кулонометрического влагомера



Сорбционно - кулонометрический метод. Данный метод является абсолютным и не требует градуировки прибора по эталонным газовым смесям. Сорбционно-кулонометрические влагомеры применяют для измерения микроконцентрации влаги в газах. Принципиальная схема кулонометрического влагомера приведена на рис. 7.20. Во внутреннем канале цилиндрического пластмассового корпуса 1 размещены два электрода 2, выполненных в виде спиралей. Между электродами нанесена пленка 3 частично гидратированного пятиоксида фосфора, обладающего очень высокой способностью сорбировать влагу. Через чувствительный элемент в направлении, указанном стрелками, проходит контролируемый газовый поток со строго постоянным расходом. Геометрические размеры чувствительного элемента и расход контролируемого газа подбирают таким образом, чтобы влага практически полностью извлекалась из газа. Обычно длина канала чувствительного элемента несколько десятков сантиметров, диаметр 0,5—2 мм; диаметр электродов не более 0,2 мм.

Поглощенная влага, соединяясь с веществом пленки, образует раствор фосфорной кислоты с высокой удельной электрической проводимостью. К электродам подключен источник постоянного напряжения, которое должно превышать потенциал разложения воды; поэтому одновременно с разложением влаги происходит ее электролиз. Получающиеся в процессе электролиза кислород и водород уносятся потоком контролируемого газа. В установившемся режиме количество поглощенной и разложенной в единицу времени воды одинаково и, следовательно, в соответствии с законом Фарадея сила тока, измеряемая микроамперметром, включенным последовательно с источником питания, является мерой концентрации влаги в анализируемом газе.

Кондуктометрический метод. Сухие твердые материалы обычно являются диэлектриками, а влажные капиллярно-пористые тела становятся проводниками. Для капиллярно-пористых материалов зависимость электрического сопротивления R от влажности W выражается соотношением

$$R = A \cdot W^n, \quad (7.17)$$

где A — постоянная величина, зависящая от свойств контролируемого материала; n — показатель степени, также зависящий от свойств материала.

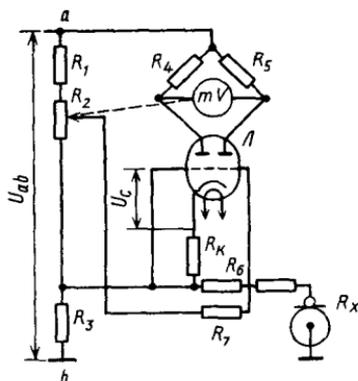


Рис. 7.21. Схема кондуктометрического влагомера

Из уравнения (7.17) следует, что зависимость R от W нелинейна. При изменении относительной влажности от 2 до 30% сопротивление изменяется очень значительно. Поэтому зависимость R от W используется как способ определения влажности обычно до 30%. Приборы, основанные на этой зависи-

мости, получили название кондуктометрических, а сам метод кондуктометрического.

Чувствительным элементом кондуктометрических влагомеров (рис. 7.21) являются два электрода, выполненные обычно в виде пластин, трубок, роликов и т. д. Измерительным устройством служат электрические мосты.

7.6. ИЗМЕРЕНИЕ ВЯЗКОСТИ ЖИДКОСТЕЙ

Вязкость — это свойство жидкостей и газов, характеризующее их сопротивляемость скольжению или сдвигу. При сдвиге двух слоев жидкости при установившемся течении возникает тангенциальная сила, которая согласно закону Ньютона определяется соотношением

$$F = \mu S (dv/dn), \quad (7.18)$$

где F — сила сдвига; μ — размерный коэффициент, называемый динамической вязкостью или просто вязкостью; S — площадь внутреннего трения (площадь сдвига); v — скорость течения слоя; n — толщина движущегося слоя; dv/dn — градиент скорости движения по толщине движущегося слоя (скорость сдвига).

Если μ не зависит от dv/dn , то жидкости называют ньютоновскими, все остальные жидкости относятся к группе неньютоновских.

За единицу динамической вязкости в международной системе единиц принята вязкость потока жидкости, в которой линейная скорость под воздействием давления сдвига в 1 Па имеет градиент 1 м/с на 1 м расстояния, перпендикулярного к плоскости сдвига. Эта единица динамической вязкости имеет размерность Па·с (паскаль — секунда).

Кинематическая вязкость в Международной системе единиц имеет размерность м²/с. Связь между динамической и кинематической вязкостью определяется соотношением

$$\nu = \mu/\rho, \quad (7.19)$$

где ρ — плотность жидкости.

Рис. 7.22. Вискозиметр с коаксиальными цилиндрами

Вязкость жидкости в значительной мере зависит от ее температуры: чем выше температура жидкости, тем меньше ее вязкость, и наоборот. Для измерения вязкости жидкостей применяют вискозиметры, основанные на следующих методах: истечения, падающего тела, крутящего момента и вибрационном.

Принципиальная схема вискозиметра с коаксиальными цилиндрами показана на рис. 7.22. В этом приборе внешний цилиндр, наполненный исследуемой жидкостью, приводится в равномерное вращение. Внутренний цилиндр удерживают неподвижным, накладывая гирьку на весовую платформу. Величина вращающего момента определяется произведением веса уравнивающих гирь на радиус шкива, на котором закреплена нить, поддерживающая весовую платформу.

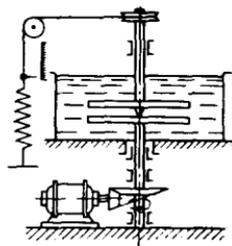
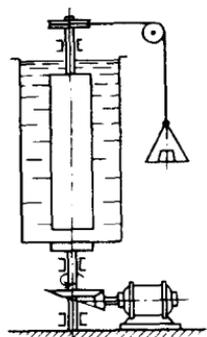
Для непрерывного измерения вязкости жидкости в технологическом потоке применяют вискозиметры с параллельными дисками (рис. 7.23).

Внутри измерительной камеры установлены неподвижные диски, между которыми с постоянной скоростью вращаются подвижные диски. Последние соединены жестко с валом двигателя. Статор двигателя закреплен в опорном подшипнике и поворачивается в сторону, противоположную направлению вращения дисков. Момент вращения, развиваемый статором двигателя, уравнивается грузом, подвешенным на тросе. Плечом груза служит профилированный диск. Плечо увеличивается с увеличением угла поворота статора.

Находясь в жидкости, диски притормаживаются и поворачивают статор двигателя до тех пор, пока развиваемый ими момент не уравнивается моментом, развиваемым грузом. Каждому значению вязкости измеряемой жидкости соответствует вполне определенный угол поворота статора двигателя. Со статором двигателя жестко связан подвижный контакт реохорда. Спротивление реохорда является плечом уравновешенного моста, шкала которого градуирована в единицах вязкости. Для стабилизации температуры контролируемой жидкости измерительная камера помещена в термостат, заполненный маслом. Класс точности прибора 1,0.

Вибрационные вискозиметры. Измерение вязкости вибрационными вискозиметрами основано на зависимости амплитуды колебаний тела в контролируемой жидкости от ее вязкости.

Рис. 7.23. Вискозиметр с параллельными дисками



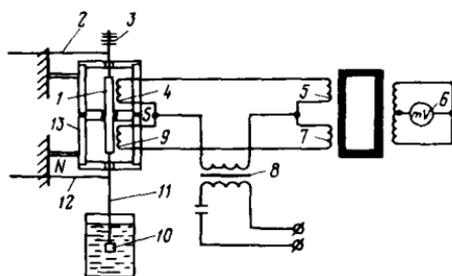


Рис. 7.24. Вибрационный вискозиметр

В зависимости от частоты колебаний вибрационные вискозиметры можно разделить на два типа: низкочастотные, работающие на частоте до 1 кГц, и ультразвуковые, работающие на частоте 10—1000 кГц.

Принципиальная схема низкочастотного вискозиметра показана на рис. 7.24. К сердечнику 1, закрепленному на двух пружинах 2 и 12, на стержне 11, прикреплены насадка 10 и сменные шайбы 3. Сердечник помещен в поле постоянного магнита 4 и 9, соединенных последовательно. При прохождении через катушки переменного тока создается переменное магнитное поле, которое, взаимодействуя с полем постоянного магнита, вызывает вибрацию сердечника 1 с насадкой 10. Амплитуда колебаний при прочих равных условиях зависит от вязкости жидкости. Чем больше вязкость, тем меньше амплитуда колебаний, и наоборот.

Амплитуда колебаний преобразуется в пропорциональное напряжение, которое измеряется милливольтметром 6 со шкалой, проградуированной в единицах вязкости. Катушки 4 и 9 питаются через стабилизатор напряжения и обмотки 5 и 7 дифференциального трансформатора 8.

Ультразвуковые вискозиметры. Действие ультразвуковых вискозиметров основано на использовании прямого и обратного магнитострикционного или пьезоэлектрического эффектов. Наибольшее распространение из ультразвуковых вискозиметров получили приборы с магнитострикционными преобразователями, работающими в импульсном режиме.

На рис. 7.25 показана принципиальная схема одного из ультразвуковых (высокочастотных) вискозиметров. Пластина 1 закреплена в торце гильзы 3. Нижняя половина пластины помещена в измеряемую жидкость. В гильзе находится катушка возбуждения 2, питаемая от генератора 4. На катушку подается импульс тока длительностью около 20 мкс, в результате этого в пластине возникают продольные колебания с затухающей амплитудой. Затухание колебаний пластины происходит тем быстрее, чем больше вязкость жидкости.

Импульс, возбуждающий катушку,

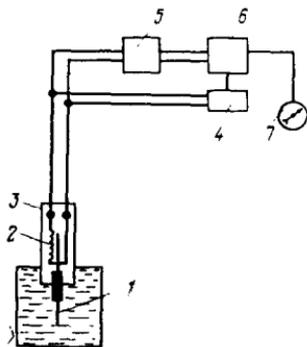


Рис. 7.25. Ультразвуковой вискозиметр

одновременно усиливается усилителем 5 и детектируется в детекторе 6 с триггером. Через триггер запирается генератор 4. Вследствие обратного магнитострикционного эффекта частота колебаний напряжения в катушке равна частоте колебаний пластины

$$U = U_m \exp(-\alpha t) \sin(\omega t), \quad (7.20)$$

где U — напряжение на концах катушки; U_m — начальная амплитуда напряжения; α — коэффициент затухания колебаний, зависящий от вязкости жидкости; ω — частота свободных колебаний пластины; t — время.

Это напряжение и обеспечивает запирание генератора импульсов до момента затухания колебаний пластины. После этого генератор импульсов снова возбуждается.

Таким образом, мерой степени затухания являются интервалы времени между последовательными возбуждениями генератора. Чем больше вязкость жидкости, тем меньше эти интервалы. Сигнал с детектора поступает на вторичный прибор 7. Шкала прибора градуирована в единицах вязкости. Погрешность вибрационных вискозиметров равна 2,5%; в зависимости от конструкции интервал измерения 0,0001—100 Па·с.

Область применения вибрационных вискозиметров ограничивается ньютоновскими жидкостями.

7.7. ГАЗОВЫЙ АНАЛИЗ

Газоанализаторы разделяют на две большие группы: химические и физические. Действие химических газоанализаторов основано на поглощении одной или нескольких составных частей газовой смеси каким-либо веществом.

В физических газоанализаторах для анализа газовой смеси используется какое-либо физическое свойство газовой смеси, изменяющееся при изменении содержания определяемого компонента. В качестве такого свойства может быть выбрана любая физическая величина, характеризующая газовую смесь (плотность, теплопроводность, теплота сгорания, коэффициент преломления и т. п.). Единственное условие выбора — аддитивность свойств выбранной величины в данной газовой смеси.

Химические газоанализаторы. Работа химических (абсорбционных) газоанализаторов основана на изменении объема газовой смеси после удаления анализируемого компонента. Удаляется анализируемый компонент абсорбцией, сжиганием или последующим поглощением. На рис. 7.26, а представлена принципиальная схема газоанализатора на CO_2 .

Определенный объем исследуемого газа засасывается в мерный сосуд B , для первичного измерения пробы газа. Затем отмеренный объем (обычно 100 см^3) пропускается через поглотительный сосуд $ПС$, заполненный раствором едкого калия; последний полностью поглощает CO_2 . Непоглощенный остаток анализируемого газа поступает в газонизмерительное устройство $ИУ$, где измеряется уменьшение объема, соответствующее поглощенному CO_2 .

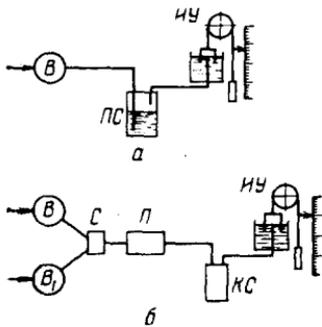


Рис. 7.26. Структурные схемы абсорбционных газоанализаторов

На рис. 7.26, б изображена принципиальная схема газоанализатора на O_2 . Эта схема существенно отличается от предыдущей. Кроме мерного объема V имеется второй объем V_1 для измерения объема водорода, подаваемого из баллона. Вместо поглотительного сосуда в этом приборе имеется электрическая печь $П$, перед

которой установлен смеситель $С$. За печью находится конденсационный сосуд $КС$, в котором конденсируются образовавшиеся при сжигании водорода водяные пары. Остаток пробы газа направляется в измерительное устройство.

Физические газоанализаторы. Из большого числа этой группы газоанализаторов ниже рассмотрены термокондуктометрические, термомагнитные, оптико-акустические и ультрафиолетового поглощения.

Термокондуктометрические газоанализаторы. Эти газоанализаторы основаны на изменении теплопроводности газовой смеси при изменении ее содержания. Теплопроводность бинарной газовой смеси в первом приближении

$$\lambda_{см} = \lambda_1 a + \lambda_2 b, \quad (7.21)$$

где λ_1 и λ_2 — теплопроводности компонентов, Вт/(м·К); a и b — концентрации компонентов, %.

Принципиальная схема термокондуктометрического газоанализатора показана на рис. 7.27. В плечи измерительного неравновешенного моста включены одинаковые сопротивления в виде нагреваемых током нитей. Две из них, включенные в противоположные плечи моста, помещены в камеры, через которые проходит исследуемый газ, а две другие — в камеры, наполненные воздухом.

Если теплопроводность измеряемой газовой смеси отличается от теплопроводности воздуха, то температуры нитей будут различны, и в диагонали ab возникнет напряжение разбаланса, пропорциональное содержанию определяемого компонента в газовой смеси. Это напряжение измеряется потенциометром, шкала которого отградуирована в процентах определяемого компонента. Для устранения влияния температуры окружающей среды на результат измерения блок измерительных ячеек термостатируют.

Термокондуктометрические газоанализаторы используют для определения содержания водорода в азотоводородной смеси в производстве синтетического аммиака; водорода в газе карбидных печей и в производстве электролитического водорода, аммиака в аммиачно-воздушной смеси производства слабой азотной кислоты, диоксида серы в печном газе производства серной кислоты.

Например, для определения содержания водорода в аммиаке в пределах 0—1% применяют преобразователь термокондуктометрический ДТ1121-УХЛ4.

Рис. 7.27. Термокондуктометрический газоанализатор:

1 — измерительная камера; 2 — сравнительная камера; 3, 5 — резисторы; 4 — лампа

Основная погрешность этих газоанализаторов составляет 2,5—10% в зависимости от интервала измерения.

Термомагнитные газоанализаторы. Эти газоанализаторы основаны на зависимости парамагнитных свойств кислорода от температуры.

Кислород относится к парамагнитным газам, характеризующимся положительной магнитной восприимчивостью. С изменением температуры взаимодействие кислорода с магнитным полем существенно изменяется. Магнитная восприимчивость кислорода, под которой понимают отношение интенсивности намагничивания к напряженности магнитного поля, на два порядка выше, чем для других газов.

Промышленность выпускает термомагнитные газоанализаторы нескольких типов.

На рис. 7.28 показана принципиальная схема преобразователя одного из таких приборов.

Преобразователь газоанализатора состоит из кольцевой камеры с горизонтальной стеклянной трубчатой перемычкой, помещенной между полюсами постоянного магнита так, что магнитное поле находится на одной стороне перемычки. На перемычку намотана двухсекционная нагреваемая обмотка из тонкой платиновой проволоки. Секции обмоток представляют собой два плеча неравновешенного моста и служат измерительными элементами. Двумя другими плечами служат постоянные манганиновые сопротивления R_1 и R_2 .

При наличии в газовой смеси кислорода часть потока отклоняется в перемычку, где образуется течение газа в направлении слева направо (от большей напряженности магнитного поля к меньшей). Образующийся конвекционный поток газа переносит тепло от обмотки R_3 к R_4 , поэтому температура секций изменяется (R_3 охлаждается, R_4 нагревается) и изменяется их сопротивление. Величина разности соп-

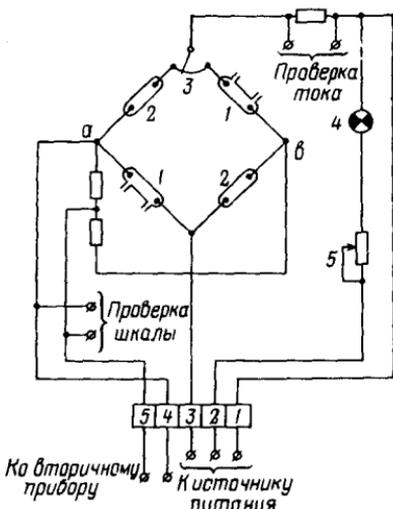
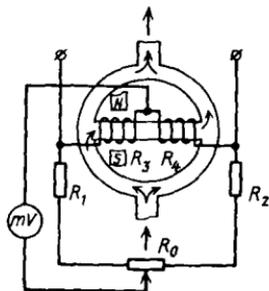


Рис. 7.28. Принципиальная схема преобразования термомагнитного газоанализатора



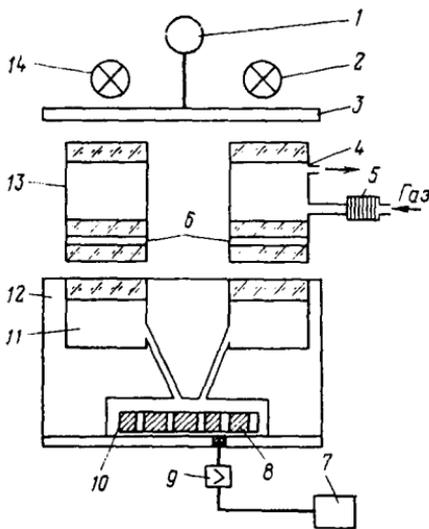


Рис. 7.29. Типовая схема оптико-акустического газоанализатора

ротивлений функционально связана с концентрацией кислорода в исследуемой газовой смеси.

Разбаланс моста измеряется вторичным прибором, шкала которого отградуирована в процентах кислорода. Сопротивление R_0 служит для установки силы тока питания моста. Система термостатирования преобразователя обеспечивает постоянство его температуры с точностью $\pm 1^\circ\text{C}$.

Оптико-акустические газоанализаторы. Приборы осно-

ваны на избирательном поглощении измеряемым компонентом инфракрасных лучей. Это явление для волн определенной длины описывается законом поглощения

$$E = E_0 \exp(-\epsilon cl), \quad (7.22)$$

где E и E_0 — соответственно энергии световых потоков после и до прохождения их через анализируемое вещество; ϵ — молекулярный показатель поглощения; c — концентрация поглощающего вещества; l — толщина слоя поглощающего вещества.

Из уравнения (7.22) следует, что при прочих равных условиях энергия светового потока, прошедшего через анализируемое вещество, является функцией его концентрации c .

На рис. 7.29 показана типовая схема оптико-акустического газоанализатора на оксид углерода. Потоки инфракрасного излучения от излучателей 2 и 14 поочередно прерываются обтюратором 3, приводимым во вращение синхронным двигателем 1. Затем потоки проходят через рабочую 4, сравнительную 13 и фильтровые 6 кюветы и попадают в лучеприемные цилиндры 11 ОАП (оптико-акустический преобразователь) 12, заполненные смесью оксида углерода с азотом.

Пулсации давления, возникающие в приемнике с частотой обтюрации, в конденсаторном микрофоне 10 с мембраной 8 преобразуются усилителем 9 в выходной сигнал, который регистрируется самописцем 7. Перед измерением рабочую кювету заполняют нулевым газом (азотом), так как сравнительная кювета тоже заполнена азотом. Потоки в рабочем и сравнительном каналах будут равны, поэтому и сигнал с приемника будет равен нулю (мембрана не колеблется). Анализируемая газовая смесь очищается от механических примесей фильтром 5. При поступлении анализируемой газовой смеси, содержащей

оксид углерода, в рабочую кювету поток в рабочем канале ослабляется и возникает сигнал с ОАП (мембрана колеблется).

Фильтровальные кюветы *б* заполняются сопутствующими измеряемому компоненту газами в анализируемой среде. Необходимость этого вызвана тем, что такие газы, как, например, диоксид углерода, имеют полосу поглощения, которая перекрывает частично полосу поглощения оксида углерода. При заполнении фильтровой камеры диоксидом углерода соответствующей концентрации та часть излучения, которая ослабляется оксидом, а поглощается диоксидом углерода, в рабочую кювету не попадает. Поэтому дополнительная погрешность из-за наличия в анализируемой среде диоксида углерода будет минимальной.

В нашей стране выпускаются оптико-акустические газоанализаторы более 10 типов. Это газоанализаторы типов ОА, ГОА, ГАИ, ГИП, «Сигма», «Кедр» на оксид и диоксид углерода, метан, ацетилен в сложных газовых смесях. Диапазон измерения концентрации этих газов от 0,001 до 100%. Классы точности приборов от 10 до 2.

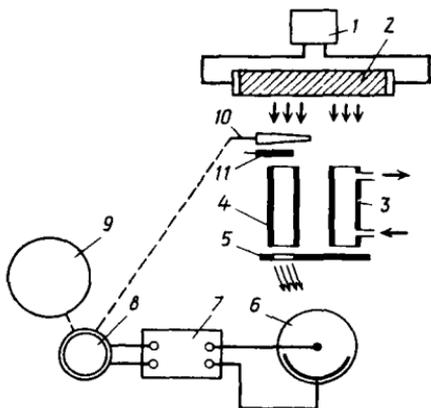
Газоанализаторы ультрафиолетового поглощения. Эти приборы в основном применяют для анализа паров ртути в воздухе, измерения концентрации хлора, сероводорода, диоксида азота и некоторых других веществ.

В качестве источников ультрафиолетового излучения используют ртутные лампы. Для преобразования интенсивности ультрафиолетового излучения в электрический сигнал применяют фотоэлементы и фоторезисторы. Схема газоанализатора на хлор с одним фотоэлементом, работающего по принципу оптической компенсации, показана на рис. 7.30.

Для выделения необходимого участка ультрафиолетовой части спектра на пути потоков установлены светофильтры. Потоки излучения прерываются obtюратором с частотой 50 Гц. Модулированные в противофазе потоки излучения поступают в измерительную и сравнительную кюветы. При появлении в измерительной кювете хлора равенство потоков излучения нарушается; в цепи фотоэлемента появляется пульсирующий фототок частотой 50 Гц, который усиливается фазочувствительным усилителем, на

Рис. 7.30. Схема ультрафиолетового газоанализатора:

1 — генератор высокой частоты; 2 — ртутно-кварцевая лампа; 3 — измерительная кювета; 4 — сравнительная кювета; 5 — obtюратор; 6 — фотоэлемент; 7 — электронный фазочувствительный усилитель; 8 — реверсивный двигатель; 9 — вторичный прибор; 10 — компенсационная заслонка; 11 — заслонка регулировки нуля



выходе которого подключен реверсивный двигатель, кинематически связанный с компенсирующим оптическим клином.

Для корректировки нуля газоанализатора служит заслонка. Интервалы измерения 0—0,3 и 0,—2%. Основная погрешность $\pm 5\%$ максимального значения шкалы.

Хроматография. Газовая хроматография — основной метод анализа сложных газовых смесей.

В соответствии с ГОСТ 17567—81 *хроматография* — область науки, изучающая процессы, основанные на перемещении зоны вещества вдоль слоя сорбента в потоке подвижной фазы и связанные с многократным повторением сорбционных и десорбционных актов. В зависимости от факторов, определяющих разделение анализируемой газовой смеси на отдельные компоненты, газовую хроматографию подразделяют: на проявительную с программированием температуры и изотермическую; с программированием расхода газа-носителя; хроматермографию.

Ниже рассмотрены некоторые методы газовой хроматографии.

При *проявительной* газохроматографии в верхнюю часть колонки, заполненную твердым адсорбентом, вводится небольшое количество анализируемой смеси (пробы). После введения пробы через хроматографическую колонку с небольшой скоростью пропускается газ-носитель, не адсорбирующийся твердым сорбентом или адсорбирующийся слабее любого из компонентов анализируемой смеси.

По мере прохождения газа-носителя взятая для разделения проба постепенно продвигается через адсорбент в хроматографической колонке. Компоненты смеси при этом отделяются один от другого и при полном разделении выходят из колонки в определенной последовательности. При полном разделении между компонентами находятся зоны чистого газа-носителя. В качестве газа-носителя применяют очищенный от пыли и масла воздух, диоксид углерода, азот, гелий, водород и др. В качестве адсорбентов (неподвижная фаза) используют активный уголь, силикагель, оксид алюминия, активный боксит, оксид магния, молекулярные сита и т. д.

При *газожидкостной* хроматографии подвижной фазой является газ-носитель, в поток которого вводится исследуемая проба (газ или пар). Неподвижная фаза — жидкость (адсорбент), адсорбирующая компоненты анализируемой смеси, распределяется тонкой пленкой на поверхности твердого носителя. Она должна быть практически нелетучей, выбор ее зависит от состава анализируемой смеси.

В качестве твердого носителя используют материалы, инертные к компонентам подвижной и неподвижной фаз и обеспечивающие достаточную поверхность фазового контакта.

Газовая хроматография с *программированием расхода* газа-носителя отличается от проявительной тем, что расход газа-

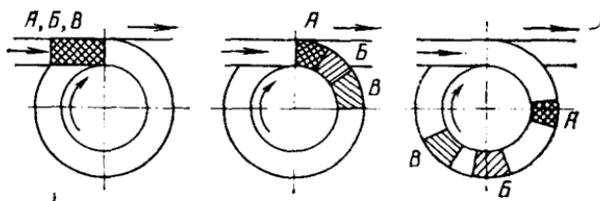


Рис. 7.31. Схема хроматографического разделения (А, Б, В — компоненты пробы газа)

носителя изменяется в течение процесса по заданному закону.

Схема хроматографического разделения показана на рис. 7.31.

Проба газа, состоящая из трех компонентов А, Б и В, перемещается газом-носителем через слой сорбента, помещенного в хроматографическую колонку. Так как компоненты сорбируются или растворяются неодинаково, скорость движения их по колонке будет различной. Через некоторое время это приведет к полному разделению смеси: первым, как менее сорбирующийся, будет компонент В, вторым Б и затем А. В результате из хроматографической колонки будут выходить или газ-носитель, или бинарная смесь (газ-носитель + компонент), что фиксируется детектором, сигнал которого пропорционален концентрации компонента в смеси.

В *хроматермографии* температура колонки изменяется в течение процесса по заданному закону по длине колонки и во времени. Следовательно, осуществляется одновременное действие перемещающегося температурного поля и потока газа-носителя.

Если наряду с подвижной фазой (газ-носитель) движется неравномерное температурное поле с градиентом в том же направлении, то имеется в виду *стационарная* хроматография. При этом компоненты смеси, перемещаясь вместе с температурным полем, занимают определенные места, соответствующие так называемым характеристическим температурам. Это дает возможность проводить автоматически качественный и количественный анализ.

При *нестационарной* хроматографии температурное поле уменьшается в направлении, обратном направлению движения газа-носителя.

В газовой хроматографии с *программированием температуры* температура колонки изменяется в течение процесса по заданному закону по ее длине и во времени.

В соответствии с ГОСТ 17567—81 *газовый хроматограф* — прибор, предназначенный для качественного и количественного анализа смесей веществ, выделения из смесей чистых компонентов или узких фракций, а также для физико-химических измерений. Газовые хроматографы подразделяются на лабораторные и промышленные.

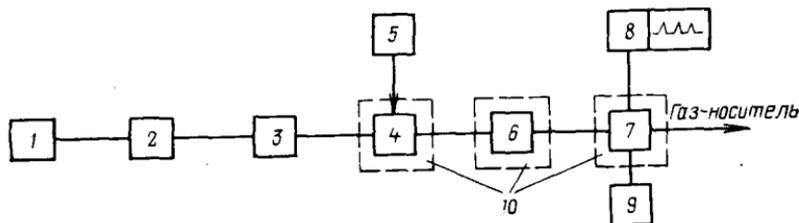


Рис. 7.32. Блок-схема газового хроматографа:

1 — баллон с газом-носителем; 2 — регулятор расхода газа-носителя; 3 — измеритель расхода газа-носителя; 4 — испаритель; 5 — дозатор; 6 — хроматографическая колонка; 7 — детектор; 8 — регистрирующий измерительный прибор; 9 — интегратор; 10 — термостаты

В состав хроматографа (рис. 7.32) наряду с основными элементами (хроматографическая колонка, детектор) входит ряд вспомогательных устройств, обеспечивающих требуемые условия работы (ввод анализируемой смеси в хроматограф, измерение и обработку выходного сигнала хроматографа и др.).

Подвижная фаза (газ-носитель) подается в колонку, как правило, из баллона, где находится под давлением. Газ-носитель должен удовлетворять требованиям: быть инертным по отношению к анализируемым веществам, неподвижной фазе и конструктивным материалам, с которыми он контактирует; содержать минимальное количество примесей; не ухудшать работу детектора.

В большинстве случаев от расхода газа-носителя зависит чувствительность детектора, т. е. изменение расхода газа-носителя вызывает изменение высоты и площади пика. Поэтому в хроматографах применяют регулятор расхода, сочетающий в себе стабилизатор и измеритель расхода газа-носителя. Расход газа-носителя в хроматографах составляет, как правило, от 15 до 200 см³/мин. Доза исследуемого вещества вводится дозатором в хроматограф быстро в виде «пробки». Газы обычно вводят герметичными газовыми шприцами или крановыми дозаторами. Объемы газовой дозы составляют от 0,1 до 10 см³. Жидкость вводят микрошприцами. В хроматографическом анализе объемы доз жидкостей обычно от 0,5 до 10 мкл. В хроматографах обычно используют краны-дозаторы и шприцы.

Иглу шприца с исследуемой дозой вводят через самоуплотняющуюся резиновую прокладку непосредственно в хроматографическую колонку. При этом начальная часть колонки не заполняется неподвижной фазой. Устройство, в котором герметично закреплены начальный участок колонки и самоуплотняющаяся резиновая прокладка, называют *испарителем*. Для поддержания требуемой температуры, при которой испаряется доза жидкой исследуемой смеси, и нагрева до необходимой температуры начального участка испаритель снабжен термостатом. Рабочие температуры испарителей в современных хроматографах составляют 500 °С и более.

Хроматографическая колонка представляет собой трубку из стекла, полимерного материала или металла, чаще всего из коррозионно стойкой стали. Колонки бывают прямые, U-образные и спиральные. Спиральные колонки наиболее компактны, поэтому их применяют чаще, чем колонки других типов. В современных хроматографах используют насадочные колонки с внутренним диаметром от 1 до 6 мм и длиной от нескольких десятков сантиметров до 6 м (средняя длина 1—2 м). Капиллярная колонка представляет собой трубку с внутренним диаметром 0,2—0,5 мм и длиной от 25 до 200 м (средняя длина 50 м). Размеры колонки существенно влияют на ее эффективность.

Хроматографические колонки устанавливают в специальном термостате. В термостаты современных хроматографов можно устанавливать две и более колонок длиной по 3—6 м. Интервал рабочих температур термостата колонок может быть от —100 до 500 °С, точность поддержания требуемой температуры составляет $\pm 0,2$ °С.

Термостат колонок, как наиболее крупный блок хроматографа, определяет конструктивные особенности хроматографа. Этот блок является основным в хроматографах, поскольку в нем размещены хроматографические колонки, а на его плоскостях — детекторы, дозаторы и испарители.

Для расшифровки бинарной смеси на выходе из колонки используется детектор.

Газохроматографический детектор — преобразовательный элемент системы газохроматографического детектирования, в котором осуществляется преобразование изменения состава проходящей через него газообразной смеси в изменение выходного сигнала. Известно более пятидесяти методов детектирования в хроматографии и соответственно столько же детекторов, но лишь несколько из них широко применяют в хроматографах. Это, в первую очередь, детектор по теплопроводности, пламенно-ионизационный, термоионный, электронно-захватный и пламенно-фотометрический.

Детекторы по теплопроводности очень чувствительны к изменению температуры, поэтому их помещают в термостаты для обеспечения стабильности нулевой линии. Основной частью детектора этого вида является термочувствительный элемент, материалом которого служит вольфрамовая или платиновая проволока, или полупроводниковый резистор.

Электрическая схема детектора по теплопроводности показана на рис. 7.33. Измерительный элемент D_1 и сравнительный элемент D_2 с резисторами R_1 и R_2 образуют мостовую схему, в диагональ которой включен источник тока E . Резисторы нагреваются до постоянной температуры. При прохождении через ячейку D_1 определяемого компонента температура ее сопротивления изменяется вследствие различия теплопроводностей компонентов анализируемой газовой смеси. Изменение температу-

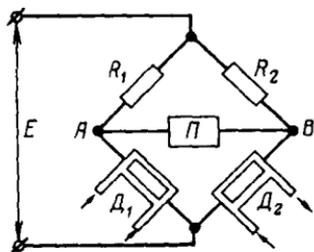


Рис. 7.33. Электрическая схема детектора по теплопроводности

ры вызывает изменение сопротивления этой ячейки. Сопротивление ячейки D_2 остается без изменения, так как через нее пропускается все время только газ-носитель. При новом значении сопротивления ячейки D_1 между точками A и B мостовой измерительной схемы возникнет разность потенциалов, которая измеряется автоматическим потенциометром Π . Записывающее устройство потенциометра вычерчивает хроматограмму.

Хроматограмма — представление сигнала газохроматографического детектора как функции времени. Нулевая линия хроматограммы — участок хроматограммы, представляющий собой запись сигнала дифференциального детектора во время выхода из хроматографической колонки чистого газа-носителя.

Кратковременное отклонение пера вторичного прибора от нулевой линии, вызванное различными помехами, называется *шумами*, непрерывное и длительное отклонение нулевой линии в одном направлении — *дрейфом нуля*.

Хроматограмма, изображенная на рис. 7.34, называется *дифференциальной* и состоит из хроматографических пиков 1 и 2.

Хроматографический пик — графическое изображение зависимости величины, пропорциональной мгновенному количеству определяемого вещества, от времени в потоке подвижной фазы на выходе колонки или в другой точке, где производится измерение.

Основание пика AB (см. рис. 7.33) получают интерполяцией основной линии между крайними точками пика. Площадь, заключенную между пиком и его основанием, называют площадью под пиком, а расстояние h от вершины пика до основания, измеренное параллельно оси ординат и представляющее собой сигнал детектора, — высотой пика. Отрезок основания μ , заключенный между касательными к точкам перегиба к каждой

стороне пика, называется шириной пика. Линия CD , параллельная основанию пика и делящая высоту пика пополам, называется полушириной пика.

Пространство от места введения пробы до детектора, за-

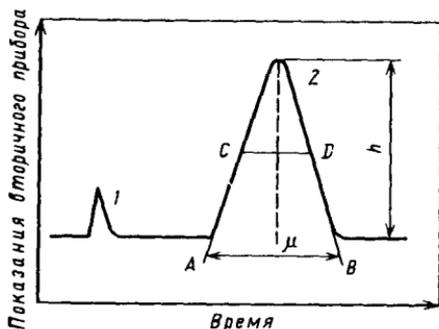
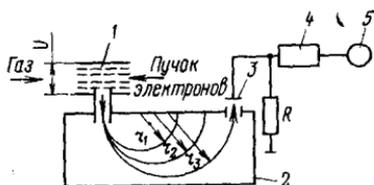


Рис. 7.34. Дифференциальная хроматограмма

Рис. 7.35. Принципиальная схема масс-спектрометра



полненное чистым газом-носителем, называется *мертвым объемом* разделительной колонки.

Объем твердого тела есть объем, занимаемый твердым носителем или активным твердым телом в колонке, а *объем жидкости* — объем, занимаемый жидкой фазой в колонке. *Свободным объемом* называется объем колонки, не занимаемый ни жидкой фазой, ни твердым носителем.

Время газохроматографического удерживания — интервал времени от момента ввода пробы в газохроматографическую колонку до момента выхода из нее определяемого вещества максимальной концентрации.

Сложность и трудоемкость ручной обработки хроматограмм, низкая точность результатов расчета, особенно в случае асимметричных или плохо разделенных пиков, существенно затрудняет практическое использование хроматографов при анализе сложных многокомпонентных смесей. Это определило использование в хроматографии специальных средств вычислительной техники для автоматизации процесса обработки хроматограмм — интеграторов и специальных вычислительных устройств на базе микро-ЭВМ (специализированные микро-ЭВМ).

Масс-спектрометрия. Преимущество масс-спектрометрического метода — быстрый и полный анализ многокомпонентных газовых смесей. При этом для анализа требуются ничтожно малые количества вещества.

В условиях глубокого вакуума молекулы или атомы анализируемого вещества ионизируются с образованием положительно заряженных ионов. Ионы, получившие ускорение в электрическом поле, разделяются по своим массам в магнитном поле. Сумма электрических зарядов движущихся ионов образует ионный ток. Измерение ионного тока, создаваемого частицами той или иной массы, позволяет судить о концентрации частиц в общем составе анализируемого вещества. В масс-спектрометре любой конструкции основной частью является масс-анализатор, в котором происходят ионизация, формирование ионного луча, разделение его на составляющие ионные лучи, соответствующие строго определенным массам, и последовательное раздельное собирание ионных лучей на коллекторе.

Соответственно этому масс-анализатор любого масс-спектрометра состоит из источника ионов, собственно анализатора, и приемника ионов. Магнитные поля, при помощи которых ионы разделяются по массам, различны. Наиболее часто применяют

поля, развернутые под углом 180° к потоку электронов, и секторные — под углом 90° и 60° .

Принципиальная схема масс-спектрометра для анализа газа, иллюстрирующая разделение ионов при помощи однородного 180° -градусного магнитного поля, показана на рис. 7.35.

В ионизационную камеру 1, находящуюся под глубоким вакуумом, системой пуска вводится анализируемая газовая смесь. Молекулы газа бомбардируются пучком электронов (от раскаленного катода). Получающиеся в результате бомбардировки положительные ионы, обладающие одинаковым положительным зарядом e , но различной массой m (для различных компонентов), имеют очень незначительную начальную энергию. Под действием электрического поля, обусловленного приложенной к стенкам ионизационной камеры разности потенциалов V , ионы получают ускорение и вылетают с определенной скоростью через щель ионизационной камеры. Далее ионы попадают в камеру 2 анализатора, где действует однородное магнитное поле с вектором напряженности H , направленным перпендикулярно плоскости чертежа. В зависимости от величины H , скорости входа ионов, т. е. от величины V , а также от величины m/e различные ионы описывают траектории различных радиусов r_1, r_2, r_3 и т. д. При постоянных V, H и e в выходную щель камеры 2 и далее на коллектор 3 попадают только ионы с определенным значением m . Попадая на заземленный через сопротивление R коллектор, ионы отдают ему свои заряды. Ионный ток создает на сопротивлении R падение напряжения, которое усиливается усилителем постоянного тока 4 и передается на измерительный прибор 5.

АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ

ГЛАВА 8

СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ И ИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ

8.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Автоматическое регулирование является наиболее сложной областью комплексной автоматизации производственных процессов и наиболее распространенной разновидностью управления непрерывными технологическими процессами.

Для каждого технологического процесса существуют такие условия работы, которые обеспечивают максимальную производительность и необходимое качество получаемой продукции при определенных затратах, длительности межремонтных периодов работы машин и аппаратов. Совокупность этих условий называется оптимальным технологическим режимом и определяется значениями некоторых переменных технологических величин или параметров. К таким параметрам относятся давление и температура в аппаратах, расход сред, используемых в технологическом процессе, уровень веществ в аппаратах, состав и качественные показатели сырья и готовой продукции. Из-за внешних воздействий, а также явлений, происходящих в аппаратах, значения указанных параметров могут изменяться, что приводит к отклонению режима процесса от оптимального.

Возникает задача восстановления режима технологического процесса, которая решается системой автоматического регулирования (САР). В результате работы САР технологические параметры поддерживаются на определенном значении без вмешательства человека. Функциональная схема САР показана на рис. 8.1.

Как и всякая система управления, САР состоит из объекта регулирования и соответствующих технических средств автоматизации.

Под объектом регулирования понимают промышленную установку, в которой автоматически регулируется технологический процесс.

Автоматический регулятор — это устройство, которое воздействует на технологический процесс с целью поддержания технологического параметра на заданном значении. Для измерения технологического параметра используется чувствительный эле-

мент, конструкция которого определяется видом этого параметра.

Исполнительным механизмом называется устройство, управляемое регулятором или дистанционно оператором и предназначенное для управления регулирующим органом.

Устройство, при помощи которого регулятор (или оператор) изменяет материальный или энергетический поток для поддержания параметра на заданном значении, называется *регулирующим органом*. Параметр технологического процесса, значение которого поддерживается равным заданному, называется *регулируемой величиной*. Поддержание равенства регулируемой величины ее заданному значению называется *регулированием*. Значение регулируемой величины, которое следует поддерживать, называется *заданным значением*, а измеренное значение регулируемой величины — *текущим значением*. Разность между текущим и заданным значениями регулируемой величины называется *рассогласованием*.

На состояние объекта регулирования и, следовательно, на значения регулируемых параметров влияют факторы, которые называются *воздействиями*. Воздействия, действующие произвольно и вызывающие отклонения регулируемых параметров от заданных величин, называются *возмущающими*.

Как сказано выше, задачей САР является компенсация влияния *возмущающих воздействий* на объект регулирования, что достигается целенаправленным изменением регулирующих воздействий. На рис. 8.2 показана принципиальная схема автоматического регулирования газа в емкости. В данной САР чувствительным элементом служит мембрана, которая при изменении давления в емкости (объекте) прогибается на определенную величину.

Для контроля величины рассогласования, т. е. сопоставления текущего и заданного значений регулируемой величины (давления в емкости) по величине и знаку, служит *элемент сравнения*. На рис. 8.2 функции элемента сравнения выполняет мембранное устройство с пружиной. При равенстве текущего P и заданного $P_{зд}$ значений давлений в объекте усилия, действующие на мембрану сверху и снизу, равны. Усилие, действующее на мембрану сверху, равно произведению давления P на пло-

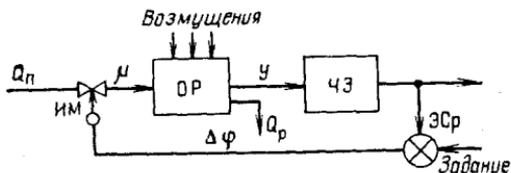
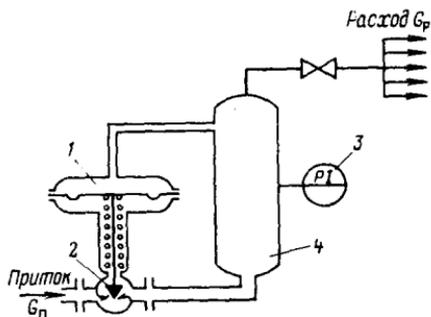


Рис. 8.1. Функциональная схема системы автоматического регулирования: ОР — объект регулирования; ЧЭ — чувствительный элемент; ЭСр — элемент сравнения; ИМ — исполнительный механизм; Q_p — приход вещества; Q_r — расход вещества; Y — регулируемая величина; $\Delta\phi$ — рассогласование; μ — регулирующее воздействие

Рис. 8.2. Принципиальная схема автоматического регулирования давления газа в емкости:

1 — мембранное устройство с пружиной; 2 — затвор клапана; 3 — манометр; 4 — газовая емкость



щадь мембраны F . Усилие же, действующее на мембрану снизу, равно силе сжатия пружины. При отклонении давления в емкости от заданного значения изменится степень

сжатия пружины, что приведет к перемещению регулирующего органа 1. Это перемещение изменит проходное сечение клапана, а следовательно, приток газа в емкость. При постоянном расходе газа из емкости это приведет к восстановлению первоначального давления в сосуде. При заданном давлении регулирующей орган 2 будет занимать положение, при котором приток Q_n равен расходу Q_p . Визуальный контроль за значением давления осуществляется по манометру 3.

Из рассмотренного примера видно, что отклонение давления в сосуде (регулируемого параметра) от заданного может происходить в результате измерения расхода или притока газа (возмущающих воздействий). Восстановление же заданного давления в сосуде достигается изменением только одного притока (регулирующего воздействия).

Принцип действия системы, показанной на рис. 8.2, называется *принципом регулирования по отклонению*, или принципом Ползунова — Уатта. Особенность его состоит в том, что регулятор в процессе регулирования оказывает воздействие на объект в том случае, если регулируемая величина отклоняется от заданного значения.

Наряду с регулированием по отклонению находит применение предложенное французом Понселе регулирование по возмущению (принцип Понселе). Этот принцип часто называют *регулированием по нагрузке*. Достоинство регулирования по возмущению состоит в том, что возмущающее воздействие может быть устранено до того, как возникнет рассогласование. Для регулирования по принципу Понселе требуются идеально точные регуляторы, что практически недостижимо.

Каждый из рассмотренных принципов — регулирование по отклонению и регулирование по возмущению — имеет свои достоинства и недостатки. Чтобы сочетать в системах регулирования положительные свойства первого и второго принципов, создали *комбинированные системы*, в которых регулирующее воздействие осуществляется и по отклонению, и по возмущению.

Следует отметить, что для автоматизации процесса нужны определенные технические средства. Однако одних указанных

средств оказывается недостаточно. Необходимо уметь не только реализовать технически, но и сформулировать математически задачу автоматизации, т. е. разработать *алгоритм управления* автоматизированным процессом.

Под алгоритмом управления понимают определенную последовательность математических и логических операций, которая должна быть выполнена системой управления в соответствии с получаемой информацией и результатами промежуточных вычислений для определения величин управляющих воздействий, обеспечивающих ведение технологического процесса в режиме, близком к оптимальному.

Действительно, чтобы возложить управление на автоматические устройства, необходимо точно сформулировать задание: что должно быть выполнено, как выполнено и какая цель должна быть достигнута. Главной для любого производственного процесса всегда была, есть и будет задача ведения процесса так, чтобы получить наилучшие результаты при наименьших затратах.

8.2. КЛАССИФИКАЦИЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

Существующие системы автоматического регулирования весьма разнообразны, поэтому необходимо их классифицировать в зависимости от тех или иных признаков.

В показанной на рис. 8.1 САР заданное значение регулируемой величины (давление) требуется поддерживать постоянным. Системы, в которых заданное значение регулируемой величины устанавливают постоянным, называются *системами стабилизации*. Эти САР представляют собой замкнутую цепь воздействий, т. е. каждый предыдущий элемент системы воздействует на последующий. Следовательно, системы автоматического регулирования работают по замкнутому циклу, т. е. являются *замкнутыми*.

В отличие от систем, работающих по отклонению, в САР, работающих по возмущению, отсутствует связь между регулируемым параметром и регулятором, т. е. САР по возмущению оказывается *разомкнутой*.

Иногда в процессе регулирования изменяют регулируемую величину по заданному закону (программе). Такие системы называются системами *программного регулирования*. Программное регулирование в основном применяют для регулирования периодических процессов.

Кроме задачи поддержания постоянного значения регулируемой величины или изменения ее по заданной программе, иногда возникает необходимость в обеспечении соответствия регулируемой величины какой-либо величине, изменяющейся в некоторых пределах во времени по произвольному, заранее неизвестному закону. Такие системы называются *следящими*. Системы автоматического регулирования, принцип действия которых основан на поиске и поддержании максимальных или минимальных зна-

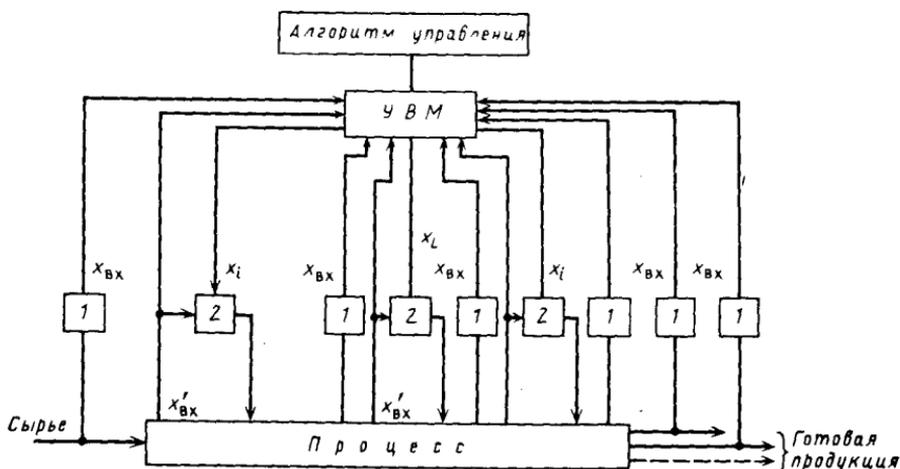


Рис. 8.3. Схема управления производственным процессом с применением вычислительной машины

чений регулируемой величины, называются системами *экстремального регулирования*.

Для сложных технологических процессов применяют *системы автоматизированного управления (АСУ)*. В этих системах сочетаются интеллект человека, мощный математический аппарат и большие возможности современной вычислительной техники. Принципиальная схема управления производственным процессом с применением вычислительной техники показана на рис. 8.3.

На линиях сырья и готовых продуктов установлены измерительные преобразователи (датчики) 1, контролирующие качество веществ и материалов, выраженное через определенные показатели $x_{вх}$ (например, химический состав, процентное содержание отдельных компонентов). Регуляторы 2 поддерживают постоянное значение регулируемых величин $x_{вх}$ (температуру, давление, расход, уровень и др.). Входные величины $x_{вх}$ и $x'_{вх}$ поступают на вход управляющей вычислительной машины (УВМ). При отклонении режима процесса от оптимального УВМ производит необходимые расчеты согласно алгоритму управления и выработывает управляющие воздействия x_i , подаваемые на регуляторы и изменяющие их настройку. Автоматические регуляторы через исполнительные механизмы (регулирующие органы) воздействуют на процесс, приводя его к оптимальным условиям.

Состояние САР, при котором возмущения отсутствуют и регулируемая величина равна заданному значению, называется *равновесным*. Равновесие системы нарушается при появлении возмущающих воздействий.

Изменение регулируемой величины во времени при регулировании называется *переходным процессом*. Последний пред-

ставляют обычно в виде графика, называемого *кривой переходного процесса САР*.

На рис. 8.4 показаны кривые возможных переходных процессов, возникающих в САР. На этом рисунке по оси абсцисс отложено время t , а по оси ординат — отклонение регулируемой величины ΔY .

Переходный процесс, представленный на рис. 8.4, *а*, называется *апериодически сходящимся*. Такой процесс допустим в САР, если время регулирования t_p и максимальное отклонение ΔY не превышают значений, допускаемых техническими условиями. На рис. 8.2, *б* показана кривая затухающего колебательного процесса регулирования. Такой процесс допустим в САР при условии, что ΔY и t_p не превышают допустимых значений.

На рис. 8.4, *в* дана кривая незатухающего колебательного процесса. В этом случае система никогда не приходит в равновесное состояние, а регулируемая величина постоянно колеблется около заданного значения. На рис. 8.4, *г* представлен расходящийся колебательный процесс. Здесь амплитуда колебаний отклонения регулируемой величины с течением времени возрастает, все дальше уходя от заданного значения. Очевидно, такой процесс не может быть допущен в САР, так как их задача — устранение отклонений.

По кривым переходных процессов реальных систем обычно судят о том, насколько полно удовлетворяют те или иные системы требованиям технических условий. По кривым переходных процессов можно судить о качестве регулирования. Переходный процесс также может возникнуть в САР и при изменении задания регулятору, т. е. при перенастройке системы на новое заданное значение регулируемой величины. В этом случае отклонение системы в переходном процессе стремится к новому равновесному значению.

На рис. 8.5 показаны кривые переходных процессов САР при изменении заданного значения регулируемой величины. В процессе изменения задания (перенастройке системы) ось абсцисс как бы переносится параллельно самой себе на величину изменения регулируемой величины (см. пункт *р*).

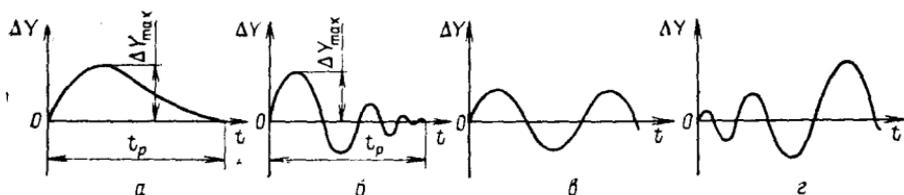
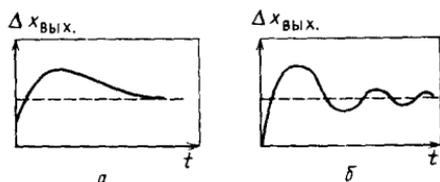


Рис. 8.4. Кривые переходных процессов САР:

а — апериодически сходящийся процесс; *б* — затухающий колебательный процесс; *в* — незатухающий колебательный процесс; *г* — расходящийся колебательный процесс; t_p — время регулирования; ΔY_{\max} — максимальное отклонение регулируемой величины от заданного значения

Рис. 8.5. Кривые переходных процессов САР при изменении задания:

a — аperiodически сходящийся; *б* — колебательно сходящийся



Системы автоматического регулирования представляют собой динамические системы, так как процесс регулирования характеризуется изменением отклонения регулируемой величины во времени. Если в процессе регулирования с течением времени система снова будет приходить в равновесное состояние, то такая САР называется *устойчивой*. Если в процессе регулирования САР не возвращается в исходное положение, а регулируемая величина при этом либо удаляется от заданного значения, либо совершает незатухающие колебания около него, то она называется *неустойчивой*. На рис. 8.4, *a* и *б* даны кривые переходных процессов устойчивых систем, а на рис. 8.4, *в* и *г* — неустойчивых. Поскольку задачей регулирования является поддержание регулируемой величины на заданном значении, очевидно, что САР должны быть обязательно устойчивыми.

Таким образом, первым основным требованием, предъявляемым к САР, является их *устойчивость*. Помимо устойчивости системы регулирования должны удовлетворять определенным требованиям, предъявляемым к качеству регулирования. Из кривых, показанных на рис. 8.4, видно, что регулирование тем лучше, чем быстрее восстановится равновесие, т. е. чем меньше время регулирования t_p . Между тем регулирование тем лучше, чем меньше отклонение регулируемой величины и чем меньше число колебаний ее за время t_p . Наконец, процесс регулирования будет тем лучше, чем точнее поддерживается заданное значение регулируемой величины.

На рис. 8.4, *a* и *б* и 8.5, *a* и *б* приведены кривые переходных процессов для САР, когда регулируемая величина возвращается точно к заданному значению. В некоторых реальных системах после завершения переходного процесса регулируемая величина не возвращается к заданному значению, т. е. имеет место остаточное отклонение. Точность таких систем оценивают величиной *остаточного отклонения*, или *статической ошибкой регулирования*. Требования к качеству регулирования задают, исходя из технологических особенностей регулируемого объекта. Следовательно, вторым требованием, предъявляемым к САР, является обеспечение заданных показателей качества процесса регулирования. Системы автоматического регулирования, в которых для приведения в действие регулирующего органа используется энергия, развиваемая чувствительным элементом, называются *системами регулирования прямого действия*, а системы, в которых используется энергия, подводимая от постороннего источ-

ника, называются *системами регулирования непрямого действия*.

Схема САР непрямого действия показана на рис. 8.6. Число элементов, составляющих систему непрямого действия, больше, чем в системе прямого действия. К элементам, перечисленным выше, добавляются преобразовательные и усилительные устройства, а также элементы обратных связей, предназначенные для формирования регулирующего воздействия в соответствии с принятым законом регулирования. Для установки заданного значения регулируемой величины используют задатчик.

При автоматизации химических производств часто применяют схемы регулирования соотношения двух потоков, которые являются следящими САР. Принципиальная схема регулирования соотношения двух потоков показана на рис. 8.7. Один из потоков считается ведущим, т. е. его расход является независимой переменной для САР соотношения. Второй поток — ведомый. Задача САР — поддерживать расход второго потока в определенном соотношении с расходом первого.

САР соотношения состоит из двух датчиков расхода 1 и $1'$, дифманометров 2 и $2'$, регулятора соотношения 3 и регулирующего клапана 4 на линии подачи второго потока.

Сигнал от датчика $1'$, пропорциональный расходу ведомого потока, поступает в регулятор как регулируемая величина. Регулятор соотношения вырабатывает сигнал, по которому регулирующийся клапан 4 изменяет расход второго потока так, что его отношение к расходу первого потока равно заданному значению.

На современном этапе развития производства задачей автоматизации следует считать такое управление производственными процессами, при котором обеспечивается максимально воз-

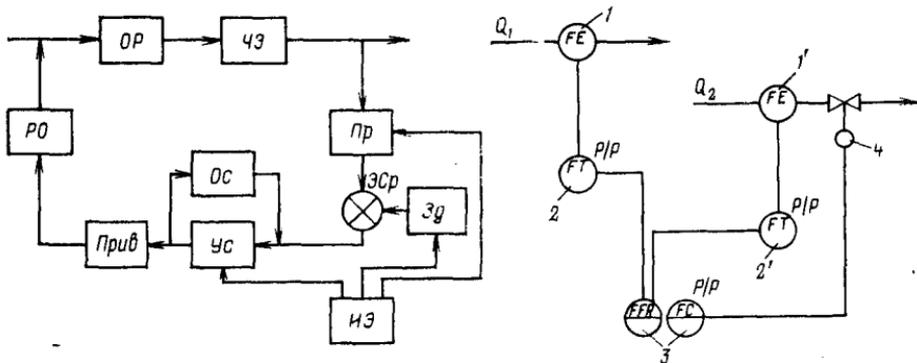
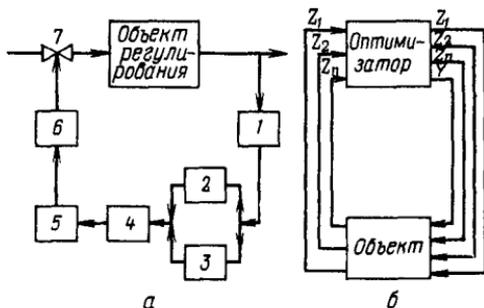


Рис. 8.6. Схема САР непрямого действия:

ОР — регулируемый объект; ЧЭ — чувствительный элемент; Пр — преобразователь; ЭСр — элемент сравнения; Зд — задатчик; ИЭ — источник энергии; Ус — усилитель; Ос — обратная связь; Прив — привод; РО — регулирующий орган

Рис. 8.7. Схема автоматического регулирования соотношения расхода двух потоков

Рис. 8.8. Функциональные схемы системы экстремального регулирования (а) и системы оптимизации (б)



можный технико-экономический эффект, определяемый оптимальным режимом работы автоматизируемых объектов. Эту задачу можно решить, используя самона-

страивающиеся системы, позволяющие управлять более сложными и менее изученными процессами и объектами.

Основой построения самонастраивающихся систем является принцип автоматического поиска направленных изменений в системе, приводящих к требуемому результату. Разработка самонастраивающихся систем требует применения вычислительных устройств, выполняющих операции запоминания в процессе поиска данных, их сравнения, а также логические операции. Такие системы имеют возможность принимать логические решения, т. е. приспосабливаться (адаптироваться) к изменяющимся условиям.

Простейшим классом самонастраивающихся систем являются системы экстремального регулирования (СЭР).

На рис. 8.8, а показана функциональная схема пневматической системы экстремального регулирования. Регулятор состоит из датчика 1, измеряющего величину параметра, блоков сравнения 2 и запоминания 3, шагового переключателя 4, блока постоянного перепада давления 5, привода 6 и регулирующего органа 7. Направление воздействия показано стрелками.

Перспективный путь развития самонастраивающихся систем состоит в комбинировании систем, основанных на вычислении оптимального режима, с системами автоматического поиска.

При этом оптимальный режим в первом приближении определяется вычислительными устройствами на основе информации о тех условиях, которые можно контролировать, и о тех неточных сведениях о свойствах и характеристиках объекта управления, которые могут быть введены в систему заранее или в ней накапливаться.

Основанная на указанном принципе система управления может автоматически изменять давление, температуру, подачу исходного продукта и другие параметры так, чтобы достигнуть максимума производительности, наилучшего качества продукции при наименьшей ее стоимости.

На рис. 8.8, б показана скелетная схема системы, содержащей объект и оптимизатор. Последний автоматически изменяет X_1, X_2, \dots, X_n — входные величины объекта. На выходе объекта измеряется величина Y , значение которой следует поддерживать максимальным или минимальным, а также измеряются величины Z_1, Z_2, \dots, Z_n , которые не должны выходить за допустимые пределы.

Оптимизатор так изменяет величину X_1, X_2, \dots, X_n , что величина Y достигает экстремума, а величины Z_i при этом лежат в допустимых пределах.

Промышленность выпускает оптимизаторы типа АР-2-О, предназначенные для работы в комплекте с малоинерционными приборами, а также типа АРС-1-ОН и АР-2-ОН для объектов со значительной инерционностью.

Из рассмотрения САР как прямого, так и непрямого действия (см. рис. 8.2 и 8.6) следует, что они состоят из некоторого числа элементов, выполняющих определенные функции. Поэтому свойства системы зависят от свойств элементов, образующих систему, а также от способов соединения их одного с другим. Свойства самих элементов определяются их статическими и динамическими характеристиками.

Статической характеристикой элемента называется зависимость выходной величины от входной в равновесных состояниях. Эту зависимость записывают в виде

$$X_{\text{вых}} = f(X_{\text{вх}}),$$

которую следует читать так: выходная величина является функцией входной величины. Статическая характеристика позволяет определить величину изменения выходного сигнала элемента под действием изменения сигнала на входе при переходе элемента из одного равновесного состояния в другое. Так как САР являются динамическими системами, т. е. процесс регулирования рассматривается во времени, то для оценки динамических свойств системы необходимо знать динамические свойства элементов, входящих в систему.

Динамической характеристикой элемента называется зависимость изменения во времени выходной величины ($X_{\text{вых}}$) в переходном режиме при определенном изменении входной величины ($X_{\text{вх}}$).

8.3. ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ТИПОВЫЕ ЗВЕНЬЯ САР

Элементы, составляющие системы регулирования, наиболее целесообразно классифицировать по их динамическим свойствам, т. е. по виду переходных процессов, возникающих в элементах при типовом изменении входной величины. В этом случае САР можно расчленить на такие элементы, которые по физическим свойствам уже не могут быть разделены на более простые. Такие простейшие элементы называются элементарными звеньями. К числу типовых элементарных звеньев относятся усилительное, апериодическое, колебательное, интегрирующее, дифференцирующее звенья и звено чистого запаздывания.

Усилительное звено. Усилительным называется такое звено, выходная величина которого изменяется пропорционально входной. Его динамическая характеристика описывается линейным дифференциальным уравнением нулевого порядка (алгебраическим)

$$X_{\text{вых}}(t) = KX_{\text{вх}}(t), \quad (8.1)$$

где K_{const} — передаточный коэффициент, или коэффициент усиления звена.

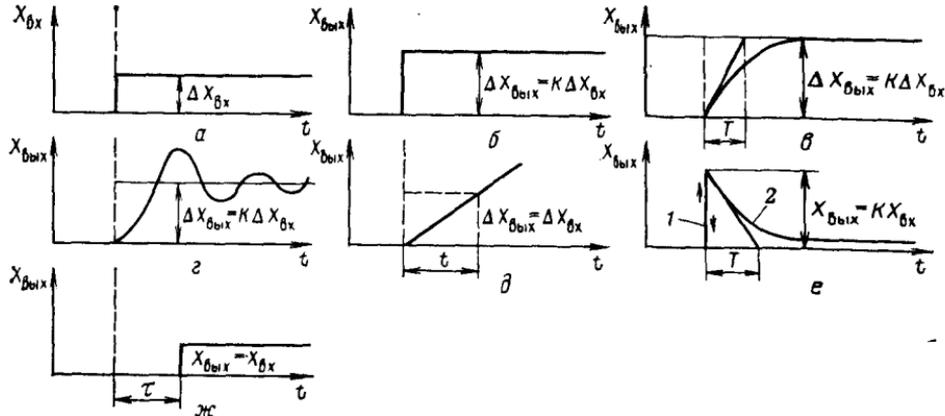


Рис. 8.9. Переходные характеристики элементарных типовых звеньев САУ: а — единичное (скачкообразное) возмущение; б — усилительное звено; в — аperiodическое; г — колебательное; д — интегральное; е — дифференциальное; ж — чистого запаздывания

Следовательно, усилительное звено изменяет только масштаб проходящего сигнала, не искажая его форму в динамическом режиме. Примерами усилительных звеньев могут служить рычажные передаточные механизмы приборов, зубчатые редукторы, электронные усилители и другие элементы САУ.

Переходная характеристика усилительного звена показана на рис. 8.9, б.

Апериодическое звено. Апериодическим называется такое звено, динамическая характеристика которого описывается линейным дифференциальным уравнением первого порядка

$$T(dX_{\text{вых}}/dt) + X_{\text{вых}} = KX_{\text{вх}}, \quad (8.2)$$

где положительная величина T называется постоянной времени и выражается в единицах времени; K_{const} — передаточный коэффициент, или коэффициент усиления звена.

Апериодическое звено не только изменяет в K раз масштаб входного сигнала, но и искажает его форму в динамическом режиме вследствие присущей этому звену инерционности. К специфическим звеньям относятся одноемкостные объекты, например газовая емкость на рис. 8.2. Переходная характеристика апериодического звена показана на рис. 8.9, в.

Колебательное звено. Колебательным называется элементарное звено, динамическая характеристика которого описывается дифференциальным уравнением второго порядка

$$T_2^2(d^2X_{\text{вых}}/dt^2) + T_1(dX_{\text{вых}}/dt) = KX_{\text{вх}}, \quad (8.3)$$

где T_2 , T_1 и K — постоянные коэффициенты.

При единичном (скачкообразном) изменении входного сигнала выходной сигнал колебательного звена изменяется на величину, пропорциональную коэффициенту усиления K , но с не-

которым отставанием во времени. При этом изменение выходной величины во времени имеет колебательный характер.

В качестве примера колебательных звеньев можно привести электрический контур, содержащий последовательно включенные сопротивление, индуктивность и емкость, мембранный исполнительный механизм, поплавковый дифференциальный манометр. Переходная характеристика колебательного звена показана на рис. 8,9, г.

Интегрирующее звено. Интегрирующим называется такое звено, динамическая характеристика которого описывается дифференциальным уравнением вида

$$T(dX_{\text{вых}}/dt) = X_{\text{вх}}, \quad (8.4)$$

где T — постоянная времени звена.

Проинтегрировав уравнение (8.4), получим

$$X_{\text{вых}} = (1/T) \int X_{\text{вх}} dt. \quad (8.5)$$

Следовательно, выходная величина этого звена изменяется пропорционально интегралу по времени от входной величины.

В качестве примера интегрирующих звеньев могут служить электродвигатель с регулируемой скоростью вращения, непроточная газовая емкость как объект регулирования давления, поршневой гидропривод. Переходная характеристика интегрирующего звена показана на рис. 8,9, д.

Дифференцирующее звено. Звено называется дифференцирующим, если его динамическая характеристика описывается дифференциальным уравнением вида

$$X_{\text{вых}} = K(dX_{\text{вх}}/dt). \quad (8.6)$$

Следовательно, выходная величина этого звена изменяется пропорционально скорости. При единичном (скачкообразном) изменении входной величины скорость изменения в момент скачка равна бесконечности. При достижении входной величины нового постоянного значения ее скорость изменения становится равной нулю. Следовательно, выходная величина получает в момент скачка входной величины мгновенный импульс, величина которого изменяется от нуля до бесконечности и снова возвращается к нулю. Переходная характеристика такого звена обозначена цифрой 1 на рис. 8,9, е.

Практически реализовать такое звено невозможно, а все реальные дифференцирующие звенья описываются уравнением

$$T(dX_{\text{вых}}/dt) + X_{\text{вых}} = KT(dX_{\text{вх}}/dt), \quad (8.7)$$

где T и K — постоянные коэффициенты.

Примером реального дифференцирующего звена может служить электрическая цепь, образованная конденсатором и сопротивлением. Переходная характеристика реального дифференцирующего звена обозначена цифрой 2 на рис. 8,9, е.

Звено чистого запаздывания. Его свойства описываются уравнением

$$X_{\text{вых}} = X_{\text{вх}}(t - \tau), \quad (8.9)$$

где $\tau = \text{const}$ — чистое запаздывание.

Примером звена чистого запаздывания является ленточный дозатор. Переходная характеристика звена чистого запаздывания показана на рис. 8.9, ж.

Так как элементы систем автоматического регулирования можно представить элементарными типовыми звеньями или их совокупностью, любую САР можно рассматривать состоящей из типовых звеньев, соединенных одно с другим.

Следует отметить, что динамические характеристики систем автоматического регулирования определяются не только динамическими характеристиками составляющих их звеньев, но и способами соединения последних.

Схемы систем регулирования, представленные соединениями элементарных звеньев, называются *структурными*. При составлении структурных схем динамические звенья изображают прямоугольниками с соответствующими передаточными функциями, а связи между ними — линиями со стрелками, указывающими направление прохождения сигнала. Применяют три вида соединений звеньев: последовательное, параллельное и с обратными связями.

Последовательным называется такое соединение звеньев, при котором выходная величина предыдущего звена является входной последующего (рис. 8.10, а).

Параллельным называется такое соединение звеньев, при котором входной сигнал является общим для всех звеньев, а их выходные сигналы суммируются (рис. 8.10, б).

Кроме параллельного и последовательного включения звеньев в практике автоматического регулирования широко приме-

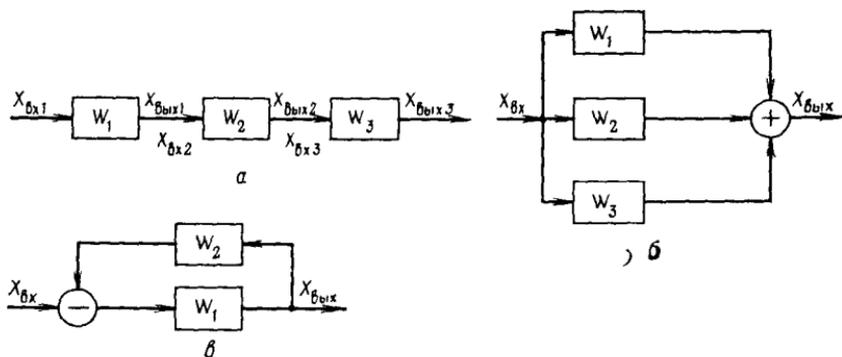


Рис. 8.10. Соединение звеньев САР:

а — последовательное; б — параллельное; в — по методу обратной связи; $X_{\text{вх}}$ — входной сигнал; $X_{\text{вых}}$ — выходной сигнал; W — передаточная функция звена (определяет его динамическую характеристику)

няют включение звеньев по принципу обратной связи. *Целью обратной связи* (рис. 8.10, в) называется звено или совокупность звеньев, которые передают сигнал с выхода данного звена на его вход (или вход одного из предшествующих звеньев) последовательной цепи.

Обратные связи бывают *положительные* и *отрицательные*. Сигнал положительной обратной связи складывается с основным входным сигналом звена, охватываемого цепью обратной связи. Сигнал отрицательной обратной связи вычитается из основного входного сигнала. В практике автоматического регулирования преимущественное распространение получили отрицательные обратные связи.

Для анализа свойств звеньев и систем широко используют понятие *передаточной функции*. Передаточная функция системы (звена) $W(P)$ представляет собой отношение преобразованной по Лапласу выходной величины $X_{\text{вых}}(P)$ к преобразованному по Лапласу воздействию на ее входе $X_{\text{вх}}(P)$ при нулевых начальных условиях

$$W(P) = X_{\text{вых}}(P) / X_{\text{вх}}(P). \quad (8.9)$$

Величина $W(P)$ зависит только от параметров системы, поэтому она полностью определяет динамические свойства систем автоматического управления.

ГЛАВА 9

ОБЪЕКТЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ И ИХ ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА

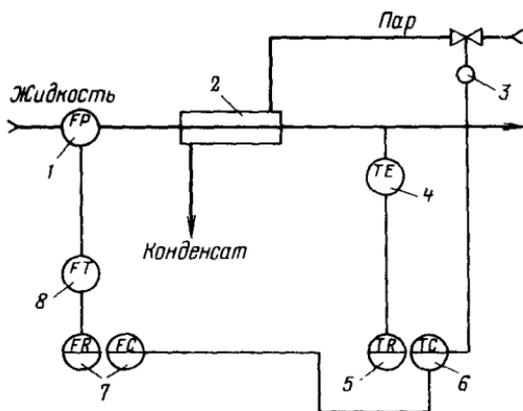
9.1. КЛАССИФИКАЦИЯ ОБЪЕКТОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ

В производственных процессах химической и других отраслей промышленности объектами регулирования являются реакторы, колонны, печи, теплообменники, смесители, насосы, компрессоры и другие машины и аппараты.

Так как объект регулирования представляет собой звено САР, ее свойства во многом зависят от объекта. В структурной схеме системы автоматического регулирования под объектом регулирования следует понимать звено, ограниченное на входе местом приложения входного воздействия, а на выходе — местом установки чувствительного элемента измерительного устройства, реагирующего на изменения регулируемой величины. Например, в схеме регулирования температуры, показанной на рис. 9.1, объект содержит теплообменник и участки трубопроводов между регулирующим клапаном и теплообменником (теплообменником и диафрагмой). На выходе объект ограничен местом отбора температуры, измеряемой термоэлектрическим преобразователем (ТЭП) 4.

Рис. 9.1. Принципиальная схема регулирования температуры на выходе теплообменника с учетом изменения нагрузки:

1 — диафрагма; 2 — трубчатый теплообменник; 3 — исполнительное устройство; 4 — термоэлектрический преобразователь температуры; 5 — вторичный прибор; 6 — регулятор; 7 — блок соотношения; 8 — дифманометр



Для создания САР, обеспечивающей требуемое качество регулирования, необходимо, прежде всего, знать свойства объекта, как статические, так и динамические. В зависимости от динамических свойств различают объекты с сосредоточенными и распределенными параметрами.

Объектами с *сосредоточенными параметрами* называют такие, в которых в состоянии равновесия регулируемые величины практически имеют одинаковые значения по всему объему объекта. В переходном режиме в любой точке такого объекта характер изменения регулируемых величин одинаков в одно и то же время. Примером объекта с сосредоточенными параметрами может служить емкость (см. рис. 8.2), регулируемой величиной в которой является давление. К объектам с сосредоточенными параметрами относятся также аппараты, в которых регулируемой величиной является высота уровня жидкости (рис. 9.2, а). Динамические свойства таких объектов описываются дифференциальными уравнениями с постоянными коэффициентами.

Объектами с *распределенными параметрами* называют такие, в которых значения регулируемых величин в разных точках объекта неодинаковы, например, температура продукта в трубчатом нагревателе по его длине (рис. 9.2, б). К таким объектам относятся ректификационные колонны, в которых существуют

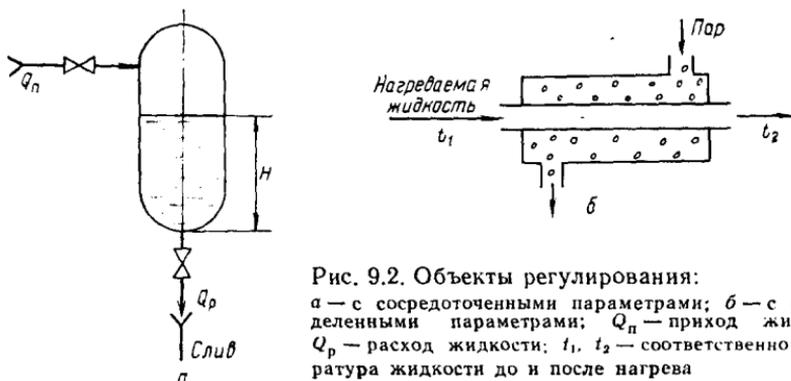


Рис. 9.2. Объекты регулирования: а — с сосредоточенными параметрами; б — с распределенными параметрами; Q_n — приход жидкости; Q_p — расход жидкости; t_1 , t_2 — соответственно температура жидкости до и после нагрева

градиенты давления, температуры и концентрации по высоте колонны. Динамические свойства объектов с распределенными параметрами описываются дифференциальными уравнениями с частными производными.

Как те, так и другие объекты могут быть линейными и нелинейными и иметь постоянные или переменные параметры. Объекты с постоянными параметрами описываются дифференциальными уравнениями, коэффициенты которых не зависят от времени и от нагрузки объекта. В объектах же с переменными параметрами последние являются функциями времени и нагрузки.

Объекты с сосредоточенными параметрами подразделяют на простые и сложные. К *простым* относятся объекты, динамические свойства которых описываются уравнениями элементарных типовых динамических звеньев, т. е. дифференциальными уравнениями, порядок которых не выше второго. Объекты, для описания динамических свойств которых необходимо применение дифференциальных уравнений более высоких порядков, относятся к *сложным*.

Почти все технологические процессы химической промышленности относятся к сложным объектам автоматизации с сосредоточенными параметрами или к объектам автоматизации с распределенными параметрами. Однако во многих случаях их можно рассматривать в виде системы, состоящей из конечного числа относительно простых объектов, соединенных определенным образом.

Технологические процессы, протекающие в типовых объектах химических производств, можно представить в виде следующих операций: поступательное движение (транспортировка сырья, промежуточных и конечных продуктов); вращательное движение (процессы перемешивания сырья и исходных материалов); нагревание и охлаждение веществ в определенном объеме, заполнение или опорожнение сосуда веществом и т. д. Большинство таких процессов характеризуется одной входной $X_{вх}$ и одной выходной $X_{вых}$ величинами. Они имеют одну степень свободы и могут быть описаны обобщенным уравнением вида

$$A (dX_{вых}/dt) = \Delta Q, \quad (9.1)$$

где A и ΔQ для каждого из рассматриваемых процессов имеют конкретные выражения.

В табл. 9.1 приведены уравнения для простейших процессов, где ΔQ — материальное или энергетическое воздействие на объект, а величина A характеризует динамические свойства объекта и определяет характер изменения $X_{вых}$ во времени. В общем случае ΔQ равно разности между притоком $Q_{п}$ и расходом $Q_{р}$ вещества или энергии в объекте, т. е.

$$\Delta Q = Q_{п} - Q_{р}. \quad (9.2)$$

Таблица 9.1. Уравнения единичных процессов

Процесс	Дифференциальное уравнение	Принятые обозначения
Заполнение (опорожнение) сосуда жидкостью	$f \frac{dH}{dt} = Q$	f — площадь уровня; H — высота (уровень); Q — объемный расход жидкости V — объем сосуда; P — давление газа; Q — объемный расход; ρ — плотность газа; G — массовый расход газа; R — газовая постоянная θ — абсолютная температура; F — вес; c — удельная теплоемкость; θ — температура; Q — тепловой поток F — вес абсолютно сухого вещества; n — относительная влажность на абсолютно сухую массу; G — масса поступающей (удаляемой) влаги за единицу времени V — объем растворителя; C — концентрация растворенного вещества (в массовых единицах, отнесенных к единице объема); G — поступление или удаление сухого вещества (по массе) в единицу времени F — масса растворенного абсолютно сухого вещества; ϵ — отношение масс растворителя и растворенного вещества, т. е. величина, обратная массовой концентрации; G — количество пара, образующегося в единицу времени; a — коэффициент пропорциональности; Q — количество тепла, подводимого в единицу времени
Заполнение (опорожнение) сосуда газом	$\frac{V}{R} \frac{dP}{dt} = G = Q_0$	
Нагревание (охлаждение) тела	$F c \frac{d\theta}{dt} = Q$	
Сушка (увлажнение) тела	$F \frac{dn}{dt} = G$	
Растворение или осаждение из раствора (суспензии)	$V \frac{dC}{dt} = G$	
Выпаривание	$F \frac{d\epsilon}{dt} = -G = -aQ$	

В состоянии равновесия воздействие на объект отсутствует, т. е. $\Delta Q = 0$. При A , отличном от нуля, $X_{\text{вых}}$ также должно быть равно нулю. С появлением ΔQ в объекте возникает переходный процесс, в котором $X_{\text{вых}}$ изменяется во времени. Характер этого изменения определяется динамическими свойствами объекта.

9.2. СВОЙСТВА ОБЪЕКТОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ

Объекты регулирования, описываемые уравнениями аperiodического и интегрирующего звеньев, называются *одноемкостными* в отличие от *многоемкостных* объектов, которые описываются уравнениями более высоких порядков.

Емкостью называется свойство объекта накапливать энергию, жидкость, газ и т. д. Вещество или энергия, поступающая на объект, встречает на своем пути сопротивление. Если в объекте регулируется уровень жидкости, то сопротивлением является гидравлическое сопротивление подводных труб. Емкость определяется размерами сосуда, в котором регулируется уровень.

Объект автоматического регулирования, состоящий из одного сопротивления и емкости, называется *однородным*. Однородный объект является фактически апериодическим звеном [см. уравнение (8.2)].

Величина T в данном случае обозначается $T_{об}$ и характеризует *емкость* объекта, т. е. количество вещества или энергии, которое находится в нем при заданном значении регулируемого параметра. При $T_{об} = \infty$ объект перестает быть регулируемым, так как регулируемая величина не зависит от параметра, на который действует регулирующий орган. При $T_{об} = 0$ объект вырождается в усилительное звено. Следовательно, емкость объекта влияет на качество регулирования.

Трубчатый теплообменник (см. рис. 9.2, *а*), где по трубе протекает жидкость, а в межтрубном пространстве — пар, является двухемкостным объектом управления.

Многоемкостным объектом является, например, ректификационная колонна, в которой число емкостей определяется числом тарелок. В многоемкостных объектах различают емкости на входе и выходе (или на стороне подачи и на стороне потребления).

Например, емкостью трубчатого теплообменника (см. рис. 9.2) на входе является тепловая емкость греющего пара (межтрубное пространство), а на выходе — тепловая емкость жидкости в трубе.

Мера емкости объекта выражается коэффициентом емкости. *Коэффициентом емкости* называется количество вещества или энергии, которое нужно подвести к объекту, чтобы изменить управляемую величину на единицу

$$C = \Delta Q : d\varphi / dt, \quad (9.3)$$

где C — коэффициент емкости; ΔQ — разность между притоком и расходом вещества или энергии; φ — регулируемая величина; t — время.

Объекты регулирования, в которых после завершения переходного процесса регулируемая величина без вмешательства извне достигает нового постоянного значения, называют объектами, обладающими *самовыравниванием*. В ряде случаев оказывается, что объекты с самовыравниванием, имеющие очень малый коэффициент усиления, не требуют применения регуляторов. Они обладают свойством саморегулируемости. Поэтому устойчивые объекты относятся к объектам, обладающим самовыравниванием, а неустойчивые — к объектам без самовыравнивания. Объекты же, которые описываются уравнением интегрирующего звена, называются *нейтральными*.

Рассмотрим примеры объектов управления с самовыравниванием и без него. Самовыравнивание может быть на входе в объект управления и выходе из него.

На рис. 9.3, *а* показан объект с самовыравниванием на входе.

В емкость 1 опущена труба 3 , по которой поступает жидкость. Приток жидкости в емкости устанавливается вентилем 2 .

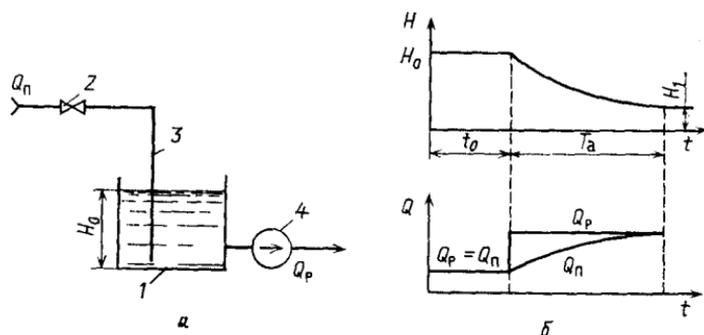


Рис. 9.3. Объект управления с самовыравниванием на входе (а) и его разгонная характеристика (б)

Расход из емкости определяется производительностью насоса 4, которая изменяется в результате ступенчатого изменения числа оборотов привода.

Если $Q_n = Q_p$, то в емкости установится определенное значение уровня, что приведет к уменьшению статического подпора жидкости в выходном сечении трубы 3. С уменьшением подпора увеличится приток жидкости в емкость и через некоторое время T_a расход и приток уравниваются, при этом уровень установится на новом значении H_1 (рис. 9.3, б).

Объект с самовыравниванием на выходе (на линии расхода) показан на рис. 9.4. В отличие от предыдущего в данном случае расход из емкости 1 устанавливается вентилем 3, а приток жидкости в емкость — вентилем 2.

Если скачкообразно увеличить приток жидкости в емкость (открыв вентиль 2), то уровень в емкости начнет плавно возрастать до тех пор, пока под действием гидростатического давления новое значение расхода станет равным новому значению притока.

Примером объекта управления с идеальным самовыравниванием может служить емкость с переливной трубой, обеспечивающей постоянный уровень в емкости при любых изменениях притока жидкости (рис. 9.5).

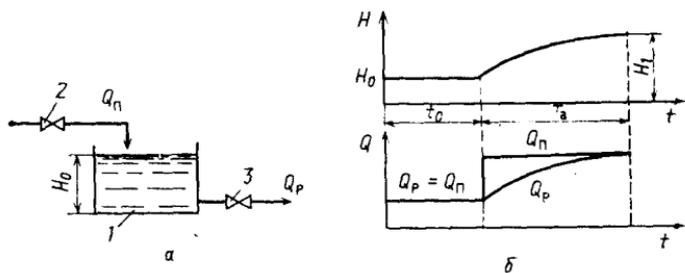


Рис. 9.4. Объект управления с самовыравниванием на выходе (а) и его разгонная характеристика (б)

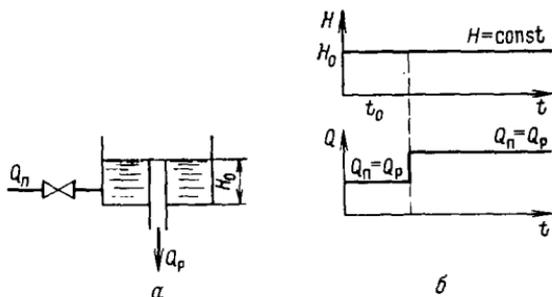


Рис. 9.5. Объект управления с идеальным самовыравниванием (а) и его разгонная характеристика (б)

Для количественной оценки способности объекта к самовыравниванию используют коэффициент самовыравнивания ρ , который равен обратной величине коэффициента усиления объекта K по рассматриваемому каналу распространения входного сигнала

$$\rho_{\mu} = 1/K_{\mu}; \quad \rho_{\lambda} = 1/K_{\lambda}. \quad (9.4)$$

Чем больше ρ , тем меньше величина остаточного отклонения регулируемой величины при одном и том же возмущающем воздействии.

Переходная характеристика объекта, вызванная ступенчатым изменением входной величины, называется *разгонной характеристикой*. Обычно статические промышленные объекты регулирования являются многоемкостными объектами, а их разгонные характеристики имеют начальные участки медленного изменения регулируемого параметра (рис. 9.6). Медленное изменение регулируемой величины в начале разгонной характеристики являются причиной *запаздывания* в системах регулирования. Чтобы характеризовать запаздывание многоемкостного объекта, проводят касательную через точку перегиба разгонной характеристики. Отрезок времени τ называется *переходным запаздыванием*.

Величина переходного запаздывания обычно возрастает с числом емкостей.

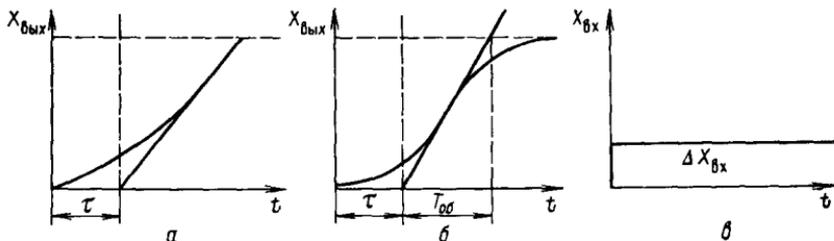


Рис. 9.6. Разгонные характеристики объектов при наличии запаздывания: а — объект без самовыравнивания; б — то же, с самовыравниванием; в — единичное возмущение

Рис. 9.7. Переходные процессы в объектах без чистого запаздывания (1) и с чистым запаздыванием (2)

Кроме переходного запаздывания существует так называемое *чистое*, или *транспортное запаздывание*. Объект с чистым запаздыванием отличается от объекта без запаздывания тем, что в нем все точки переходного процесса сдвигаются по оси времени вправо на постоянную величину.

Величина эта, $\tau_{\text{ч}}$, называется чистым, или транспортным запаздыванием.

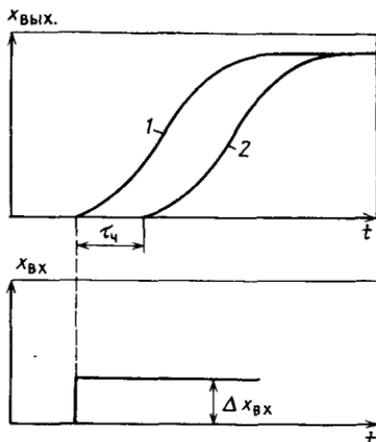
На рис. 9.7 для сравнения показаны переходные характеристики объекта без чистого запаздывания (кривая 1) и в аналогичном объекте с чистым запаздыванием величиной $\tau_{\text{ч}}$ (кривая 2). Как видно из рис. 9.2, переходный процесс в объекте с чистым запаздыванием начинается на $\tau_{\text{ч}}$ после нанесения возмущения.

Чистое запаздывание вызывается наличием в регулируемом объекте участков, по которым распространение сигналов требует некоторого времени $\tau_{\text{ч}}$. К таким элементам относят транспортеры, элеваторы, лотки, длинные трубопроводы и т. д. Запаздывание в системах автоматического регулирования является фактором, ухудшающим качество процесса регулирования. Значительное запаздывание в объектах часто затрудняет регулирование, а иногда делает его почти невозможным. Объясняется это тем, что воздействие регулятора на объект зависит не от состояния системы в данный момент, а от ее состояния в некоторый предшествующий период. Поскольку за время, обусловленное запаздыванием, состояние САР может измениться, воздействие регулятора, не воспринявшего еще изменение, может быть направлено в сторону усиления возмущающего воздействия, а не в направлении его устранения. Запаздывание увеличивает отклонение параметра от заданного значения, удлиняет переходный процесс и может привести к неустойчивому регулированию.

Устранение вредного влияния запаздывания в САР достигается применением регуляторов с предварением и схем связанного регулирования.

9.3. ВОЗМУЩАЮЩИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ В ОБЪЕКТАХ РЕГУЛИРОВАНИЯ

Технологический процесс находится в состоянии равновесия только в том случае, если поступление в объект и расход из него вещества и энергии равны. При нарушении материального



или энергетического баланса в результате любого возмущающего воздействия равновесие в объекте нарушается и действительное значение управляемой величины отклоняется от заданного. Величина и скорость отклонения зависят от амплитуды и спектра возмущающего воздействия, а также от динамических и статических характеристик САР. Чем больше амплитуда и скорость возмущающего воздействия, тем труднее управляющему устройству восстановить равновесие в объекте.

Промышленные САР химических процессов обладают нелинейными свойствами, но во многих случаях их можно рассматривать с определенной погрешностью как линейные системы при достаточно малых отклонениях от состояния равновесия.

Однако если возмущения велики, то предположение о линейности САР может оказаться недопустимым, и тогда при проектировании системы нужно принимать в расчет ее нелинейные свойства.

Основным источником возмущения является изменение нагрузки управляемого объекта.

Количество сырья и энергии можно автоматически стабилизировать до поступления их в объект. Трудно стабилизировать состав сырья на входе объекта, поэтому его изменения являются источником возмущающих воздействий.

В случаях изменения нагрузки объекта перестройку необходимо производить медленно, чтобы САР плавно, без больших и продолжительных колебаний перешла на новый режим работы.

Кроме того, при больших изменениях нагрузки может возникнуть необходимость в изменении настроек регуляторов, так как с изменением нагрузки изменяются динамические и статические свойства управляемых объектов. Например, при уменьшении нагрузки увеличивается чистое запаздывание, уменьшаются коэффициент самовыравнивания, емкость, коэффициент емкости и постоянная времени объекта. Поэтому разным нагрузкам объекта соответствуют различные оптимальные настройки управляющих устройств.

Возмущения, возникающие из-за изменения характеристик управляемого объекта, например при постепенном загрязнении поверхности теплопередачи, засорении фильтров, изменении свойств катализатора, выражаются обычно в форме медленных сдвигов. Однако встречаются и быстрые изменения статической и динамической характеристик объекта, например в результате обвала насадки или постепенно нарастающего слоя загрязнения внутри аппарата. Всегда нужно стремиться к уменьшению возмущающих воздействий до входа их в управляемый объект.

В многоемкостных управляемых объектах форма переходного процесса зависит не только от вида возмущающего воздействия, но и от места его приложения к объекту (рис. 9.8).

Представленный на этом рисунке объект состоит из емкостей 2 и 5. Выходная величина измеряется в точке 6 при помо-

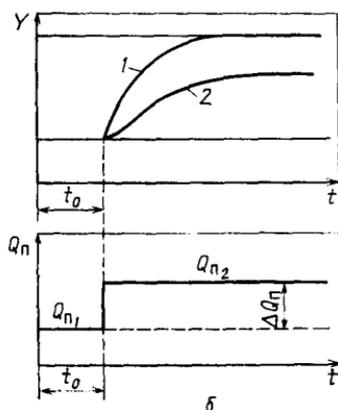
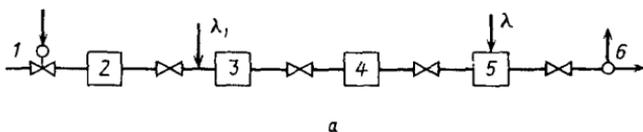


Рис. 9.8. Блок-схема четырехъемкостного объекта управления (а) и его разгонные характеристики, определяемые методом приложения возмущающих воздействий (б):

1 — регулирующий орган; 2, 3, 4, 5 — емкости объекта; 6 — датчик

щи устройства, передающего сигнал на регулятор, который управляет исполнительным органом 1. При изменении нагрузки объекта форма кривой разгона зависит от места приложения возмущающего воздействия. Если возмущающее воздействие λ приложено к выходной емкости 5, то соответствующая разгонная характеристика (кривая 1) имеет форму экспоненты, т. е. как в одноемкостном объекте.

При приложении возмущающего воздействия λ_1 перед емкостью 3 разгонная характеристика (кривая 2) имеет форму, соответствующую трехъемкостному объекту. Из рис. 9.8 видно, что чем ближе к измерительному устройству место ввода возмущающего воздействия, тем больше начальное отклонение управляемой величины от заданного значения. Следовательно, возмущающие воздействия на входе объекта вызывают меньшее отклонение регулируемой величины от заданного значения, чем равные им по величине возмущающие воздействия, приложенные к его выходу.

Например, в трубчатом теплообменнике (см. рис. 9.2) возмущения в подаче греющего пара (входная емкость) приводят к меньшему максимальному начальному отклонению от заданного значения температуры жидкости на выходе из теплообменника, чем равные по величине изменения температуры или количества холодной жидкости на входе в теплообменник (выходная емкость объекта).

Рассмотренные выше примеры относятся к объектам управления с несвязанными или мало связанными между собой регулируемым величинами.

На рис. 9,9,а приведена структурная схема такого объекта. Из рисунка видно, что возмущение λ_1 воздействует только на величину Y_1 , а возмущение λ_2 — только на величину Y_2 . Регулирующее воздействие μ_1 воздействует только на Y_1 , а регулирующее воздействие μ_2 — только на Y_2 . В более сложных технологических процессах регулируемые величины связаны между собой.

На рис. 9.9,б показана структурная схема объекта управления с двумя связанными между собой регулируемым величинами. Примером реального объекта, изображенного такой структурной схемой, может служить кипятильник ректификационной колонны, в котором регулируется температура Y_1 и уровень жидкости Y_2 (для упрощения давление в колонне и кипятильнике не рассматривается). Основными возмущающими воздействиями являются изменения состава λ_1 и количества λ_2 жидкости, поступающей из колонны в кипятильник. Из структурной схемы видно, что возмущение λ_1 распространяется в объекте по каналам с передаточными функциями V_{11} и V_{22} и воздействует на обе регулируемые величины Y_1 и Y_2 . Возмущающее воздействие λ_2 также влияет на Y_1 и Y_2 , но по каналам с передаточными функциями V_{21} и V_{22} .

Регулирующее воздействие μ_1 (расход греющего пара) распространяется в объекте по каналам с передаточными функциями W_{11} и W_{22} , изменяя таким образом обе регулируемые величины Y_1 и Y_2 . Регулирующее воздействие μ_2 (уровень жидкости), распространяющееся по каналам в объекте с передаточными функциями W_{21} и W_{22} , изменяет величины Y_1 и Y_2 . Каналы с передаточными функциями W_{11} и W_{22} называются *основными*, а каналы с передаточными функциями V_{11} и V_{22} — *перекрестными*. Очевидно, что в этом случае каждая регулируемая величина находится под одновременным воздействием обоих регулирующих воздействий, что ведет к ухудшению качества САР.

Ослабить или полностью развязать внутренние связи с перекрестными каналами можно двумя способами: 1) выбирая в качестве регулируемых величин несвязанные или слабо связанные между собой параметры; 2) создавая системы связанного регулирования введением в САР дополнительных внешних ком-

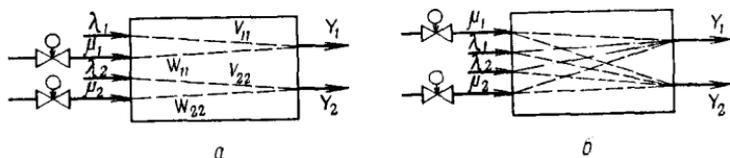


Рис. 9.9. Структурные схемы объектов:

а — с несвязанными величинами; б — со связанными величинами

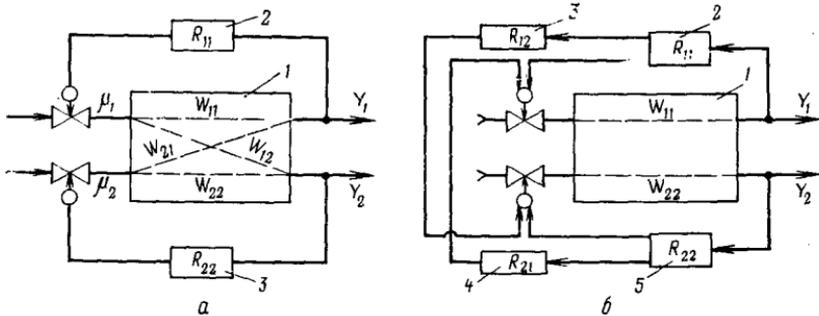


Рис. 9.10. Структурные схемы САР:
а — несвязанная; б — связанная

пенсующих связей между регуляторами. На рис. 9.10, а показана структурная схема несвязанной, а на рис. 9.10, б связанной САР с последовательным включением основных и компенсирующих регуляторов, такая САР называется *автономной*.

Структурная схема состоит из объекта управления 1 двух основных регуляторов 2 и 5 и двух компенсирующих 3 и 4. Каждая из двух регулируемых величин Y_1 и Y_2 находится под воздействием возмущения λ и регулирующих воздействий μ_1 и μ_2 по основным и перекрестным каналам. Внутренние связи между регулируемыми величинами компенсируются введением в систему компенсирующих регуляторов 3 и 4. Например, регулирующее воздействие μ_1 , предназначенное для управления параметром Y_1 по основному каналу W_{11} , не должно оказывать воздействия по перекрестному каналу W_{12} на параметр Y_2 . Если перекрестный канал нельзя разомкнуть, то не допустить изменения параметра Y_2 под воздействием μ_1 можно при помощи компенсирующего перемещения второго регулирующего клапана на величину $\Delta\mu_2$. Эту функцию выполняют компенсирующие регуляторы.

ГЛАВА 10

АВТОМАТИЧЕСКИЕ РЕГУЛЯТОРЫ И ИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ

10.1. КЛАССИФИКАЦИЯ АВТОМАТИЧЕСКИХ РЕГУЛЯТОРОВ

В промышленных системах регулирования под действием возмущающих воздействий регулируемая величина отклоняется от заданного значения. Регулятор должен компенсировать это отклонение. Большое разнообразие технологических процессов обуславливает значительное число автоматических регуляторов.

По виду регулируемой величины различают регуляторы температуры, расхода, уровня, давления, скорости, влажности и т. д. По конструктивному исполнению регуляторы подразделяются на приборного типа и регуляторы, выполненные по агрегатному и элементному принципам.

В *регуляторах приборного типа* измерительное устройство, элемент сравнения, задатчик, усилитель и другие элементы сконструированы в одном корпусе. В регуляторах, построенных по *агрегатному и элементному* принципам, измерительное устройство и задатчик выполнены обычно отдельно от других элементов. В регуляторах, построенных по элементному принципу, каждому функциональному действию соответствует один или группа элементов. Например, элемент сравнения, усилитель и элементы, формирующие закон регулирования.

По роду действия автоматические регуляторы подразделяются на регуляторы прерывистого и непрерывного действия. Регуляторами *прерывистого действия* называются такие, регулирующей орган которых перемещается только при достижении непрерывно изменяющейся регулируемой величиной определенных заданных значений. Регуляторами *непрерывного действия* называются такие, регулирующей орган которых при непрерывном изменении регулируемой величины изменяется непрерывно.

По способу действия различают регуляторы прямого и косвенного действия. Регуляторами *прямого действия* называются такие, регулирующей орган которых приводится в действие энергией регулируемой среды. Эти регуляторы не требуют посторонней энергии, и регулирующей орган в них конструктивно объединен с измерительным устройством. Регуляторами *косвенного (непрямого)* действия называются такие, регулирующей орган которых приводится в действие энергией, подводимой от постороннего источника. По виду подводимой энергии регуляторы косвенного действия подразделяются на пневматические, электрические и гидравлические.

Основной характеристикой регулятора является характеристика действия, или *закон регулирования*, под которым понимают вид математической зависимости между входной и выходной величинами регулятора. Законы регулирования подразделяются на линейные и нелинейные.

Из регуляторов с нелинейными законами регулирования в химической промышленности применяют двух- и трехпозиционные регуляторы (P_3 -регуляторы).

Регуляторы с линейными законами регулирования подразделяются на интегральные (И-регуляторы), пропорциональные (П-регуляторы), пропорционально-интегральные (ПИ-регуляторы), пропорционально-дифференциальные (ПД-регуляторы) и пропорционально-интегральные-дифференциальные (ПИД-регуляторы).

10.2. ПОЗИЦИОННЫЕ РЕГУЛЯТОРЫ

Автоматические регуляторы, регулирующий орган которых может занимать ограниченное число определенных положений, называются *позиционными*. Они относятся к группе регуляторов прерывистого действия. Чаще всего применяют двух- и трехпозиционные регуляторы.

Затвор регулирующего органа двухпозиционных регуляторов может занимать только два положения — открытое или закрытое. Перемещение регулирующего органа из одного положения в другое происходит при достижении регулируемой величиной заранее установленного (заданного) значения и осуществляется скачкообразно. Регулирующий орган трехпозиционных регуляторов кроме двух крайних имеет еще одно среднее положение, что способствует более плавному изменению управляемой величины.

Примером двухпозиционного регулятора может служить dilatометрический термометр с контактной системой (рис. 10.1, а). Термометр состоит из трубки 2, изготовленной из металла с большим коэффициентом линейного расширения (медь, латунь, алюминий, сталь) и стержня 3, изготовленного из материала с малым коэффициентом линейного расширения (кварц, фарфор, инвар). Стержень 3 опирается на пробку 1 в трубке 2, которая ввернута в головку 5. В последней помещен рычажный передаточный механизм 6, 7, 8 и 12, снабженный электрическими контактами. Термометр при помощи ниппеля 4 ввинчивается в бобышку, укрепленную в нагревательной печи 14 (рис. 10.1, б).

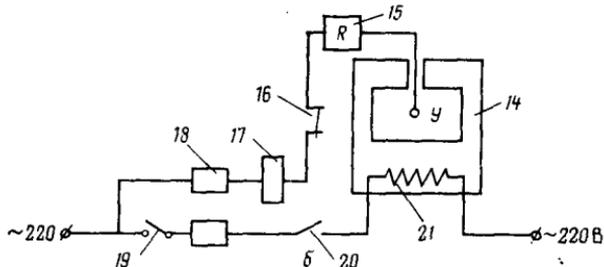
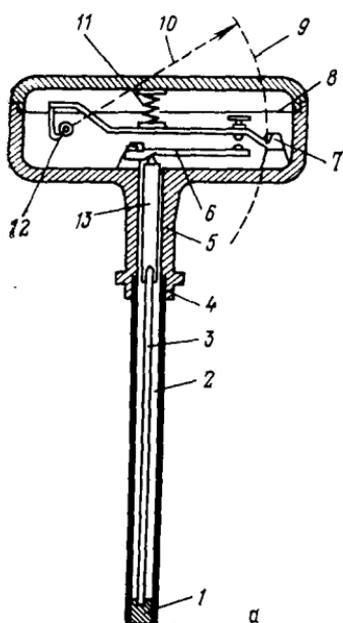


Рис. 10.1. Двухпозиционный dilatометрический регулятор температуры (а) и принципиальная схема двухпозиционного регулирования (б):

1 — пробка; 2 — трубка; 3 — стержень; 4 — ниппель; 5 — головка; 6, 7, 8 — рычаги с электрическими контактами; 9 — шкала; 10 — стрелка; 11 — пружина; 12 — шарнир рычага 7; 13 — свободный конец стержня 3; 14 — печь; 15 — dilatометрический регулятор температуры; 16 — управляющие контакты регулятора (на рычагах 7 и 8); 17 — катушка контактора; 18 — предохранители; 19 — выключатель; 20 — контакт контактора; 21 — электронагреватель печи

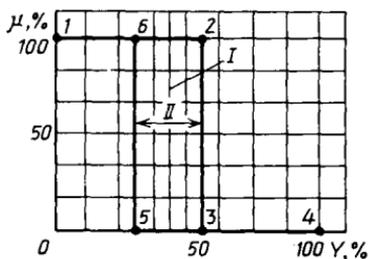


Рис. 10.2. Статическая характеристика Пз-регулятора:

I — заданное значение; *II* — нейтральная зона

При повышении температуры трубка 2 удлиняется больше, чем стержень 3, поэтому свободный конец 13 стержня 3 перемещается вниз. Вместе с ним перемещаются вниз концы рычагов 6 и 7. Движение далее передается стрелке 10, которая указывает на шкале 9 температуру в градусах.

При перемещении рычага 7 вниз контакт между ним и рычагом 8 контакта 16 на рис. 10.1, б размыкается. При этом обесточивается катушка 17 контактора, что обеспечивает размыкание контакта 20 и отключение нагревателя 21. При понижении температуры в печи трубка 2 укорачивается, что вызывает замыкание контактов между рычагами 7 и 8 и в конечном итоге включение электронагревателя 21 печи 14 (рис. 10.1, б).

Установка заданного значения регулируемой величины (температуры) производится изменением жесткости пружины 11.

В реальных двухпозиционных регуляторах изменение выходного сигнала от минимального до максимального значения и наоборот происходит при различных значениях входной величины, как это показано на рис. 10.2. Разность между значениями входной величины в моменты изменения выходного сигнала называют *зоной нечувствительности* регулятора. Минимальная величина зоны нечувствительности зависит от зазоров и сил трения, а также обусловлена необходимостью создания определенных усилий для размыкания электрических контактов.

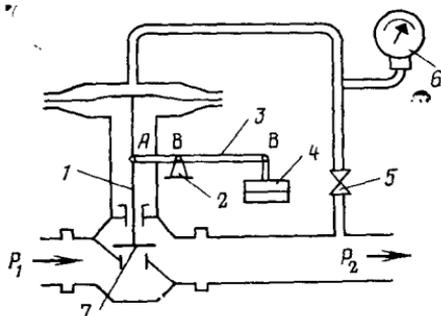
Из рис. 10.2 видно, что при повышении температуры выходная величина регулятора изменяется по линии, обозначенной точками 1, 2, 3 и 4. Точки 2 и 3 соответствуют мгновенному перемещению контактов из закрытого положения в открытое, т. е. от $\mu = 100\%$ до $\mu = 0$. При понижении температуры произойдет замыкание электрических контактов рычагов 7 и 8 (см. рис. 10.1), т. е. выходная величина регулятора изменится по линии, обозначенной точками 4, 5, 6 и 1. Точки 5 и 6 соответствуют мгновенному перемещению регулирующего органа из открытого положения в закрытое. Зона нечувствительности регулятора определяется в основном расстоянием между контактами рычагов 7 и 8 (см. рис. 10.1). Настраиваемую зону нечувствительности в промышленных регуляторах называют *зоной возврата* и обозначают через Δ .

10.3. ИНТЕГРАЛЬНЫЕ РЕГУЛЯТОРЫ (И-РЕГУЛЯТОРЫ)

Интегральными называют такие регуляторы, одному и тому же значению регулируемой величины которых могут соответствовать различные положения регулирующего органа.

Рис. 10.3. Принципиальная схема И-регулятора прямого действия:

1 — шток; 2 — точка опоры; 3 — рычаг; 4 — груз; 5 — вентиль; 6 — манометр; 7 — затвор регулирующего органа



На рис. 10.3 показана схема И-регулятора давления прямого действия, предназначенного для поддержания заданного значения давления P_2 газа в трубопроводе. Измерительным устройством регулятора является мембранный механизм. Штоком 1 мембрана связана с затвором 7 регулирующего органа. Со штоком 1 жестко связан также рычаг 3, к которому прикреплен груз 4. Пространство под мембраной сообщается с атмосферой.

Регулятор и система регулирования в целом могут находиться в равновесном состоянии только при условии равенства моментов сил относительно точки опоры 2. Один из этих моментов создается силой давления газа на мембрану, другой — весом груза 4. Если момент силы давления газа больше момента силы, создаваемого грузом, то мембрана прогибается вниз, перемещая шток с затвором. Шток с затвором будет перемещаться вверх только в том случае, если момент силы, создаваемый грузом 4, будет больше момента силы, создаваемого давлением газа на мембрану.

Следовательно, изменяя задание (величину груза или соотношение плеч рычага АВ), можно изменять заданное значение давления P_2 (давление в линии расхода). Скорость перемещения регулирующего органа при этом пропорциональна отклонению регулируемой величины от заданного значения, поэтому уравнение закона регулирования можно записать в виде

$$d\mu/dt = -S_0 Y, \quad (10.1)$$

где S_0 — настроечный параметр регулятора.

Знак минус в правой части уравнения (10.1) означает, что при положительном отклонении регулируемой величины от задания регулирующий орган будет закрываться, а при отрицательном — открываться. Интегрирование уравнения (10.1) дает

$$\mu = -S_0 \int_0^t Y dt$$

или

$$X_{\text{вых}} = -S_0 \int_0^t X_{\text{вх}} dt. \quad (10.2)$$

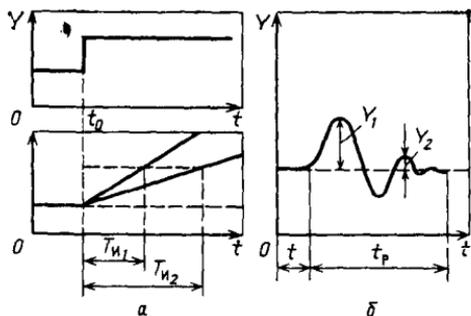


Рис. 10.4. Переходные характеристики И-регулятора (а) и САР с И-регулятором (б)

Следовательно, изменение выходной величины данного регулятора пропорционально интегралу изменения входной величины. Зависимость (10.2) определяет название регулятора.

Передаточная функция И-регулятора имеет вид

$$W_p(P) = 1 T_p P. \quad (10.3)$$

Интегральный регулятор представляет собой интегрирующее звено, время интегрирования которого можно изменить в некоторых пределах, определяемых конструкцией регулятора.

На рис. 10.4 показаны характеристики И-регулятора. Интегральные регуляторы не имеют статической характеристики. Из переходной характеристики И-регулятора (рис. 10.4, а) видно, что регулирующий орган перемещается с постоянной скоростью. Причем чем меньше время интегрирования, тем круче переходная характеристика. На рис. 10.4, б отражен типичный переходный процесс регулирования в САР с интегральными регуляторами. Этот переходный процесс, как и всякий затухающий колебательный процесс, характеризуется двумя величинами: временем регулирования t_p и степенью затухания ψ . Последняя равна отношению разности двух соседних амплитуд одного знака к первой из них

$$\psi = (Y_1 - Y_2) / Y_1. \quad (10.4)$$

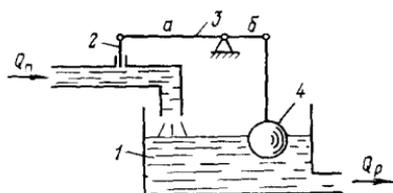
Оптимальное значение ψ для САР равно 70—80%. Недостатком интегральных регуляторов является относительно невысокая скорость регулирования. Она тем меньше, чем больше время интегрирования. И-регуляторы не могут применяться на объектах, не обладающих самовыравниванием. Система, состоящая из объекта без самовыравнивания и интегрального регулятора, неустойчива.

10.4. ПРОПОРЦИОНАЛЬНЫЕ РЕГУЛЯТОРЫ [П-РЕГУЛЯТОРЫ]

Пропорциональными называют такие регуляторы, отклонение регулируемой величины которых от заданного значения вызывает перемещение регулирующего органа на величину, пропорциональную величине этого отклонения.

На рис. 10.5 показана схема пропорционального регулятора уровня прямого действия. Перемещение поплавка 4 через рычаг 3 передается заслонке 2, установленной в трубопроводе, по которому жидкость поступает в емкость 1. При уменьшении рас-

Рис. 10.5. Пропорциональный регулятор уровня прямого действия



хода Q_p жидкости из аппарата уровень повышается, и поплавков перемещается вверх. Заслонка 2, перемещаясь при этом вниз, уменьшает приток Q_n жидкости, что влечет за собой прекращение изменения уровня. При понижении же уровня поплавков опускается вниз, приводя к перемещению заслонки вверх и увеличению притока жидкости. Уровень стабилизируется.

Из рис. 10.5 видно, что в данном регуляторе перемещение заслонки пропорционально перемещению поплавка. Эта пропорциональность определяется соотношением плеч a и b рычага 3. Следовательно, простейший пропорциональный регулятор представляет собой усилительное звено и описывается уравнением

$$\mu = -S_1 Y \quad \text{или} \quad X_{\text{вых}} = -S_1 X_{\text{вх}}, \quad (10.5)$$

где S_1 — настроечный параметр (коэффициент усиления) пропорционального регулятора.

Настроечный параметр пропорционального регулятора часто представляют в виде величины δ , обратной коэффициенту усиления и выраженной в процентах, т. е.

$$\delta = (1/S_1) 100. \quad (10.6)$$

Например, если коэффициент усиления регулятора равен 20, то $\delta = 5\%$; если же коэффициент усиления равен 1, то $\delta = 100\%$.

Величину δ называют *пределом пропорциональности*. Она показывает, какому отклонению регулируемой величины (в % от максимально возможной для данной САР) соответствует перемещение регулирующего органа из одного крайнего положения в другое.

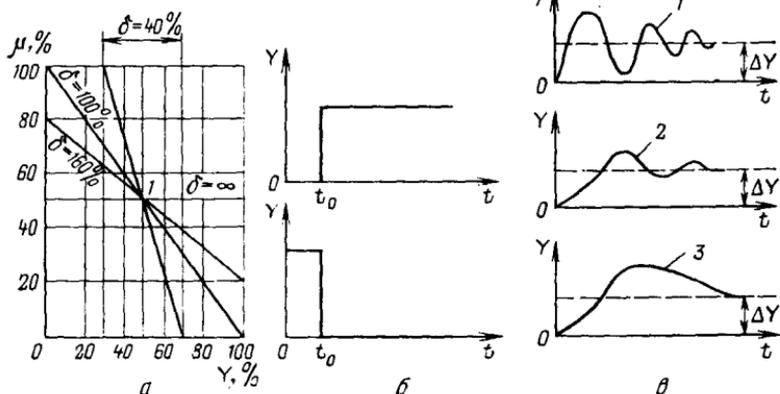


Рис. 10.6. Характеристики П-регулятора и системы регулирования: а — статическая; б — переходная; в — переходный процесс САР

На рис. 10.6 показаны статические характеристики пропорционального регулятора в координатах $Y-\mu$, где Y — относительное изменение регулируемой величины, μ — относительное перемещение регулирующего органа. Из рис. 10.6 видно, что регулирующий орган начинает перемещаться только при достижении регулируемой величиной нижнего предела пропорциональности.

Например, если регулируемая величина соответствует 50% шкалы регулятора, а предел пропорциональности настроен на 40% ($\delta=40\%$) и регулирующий орган занимает среднее положение ($\mu=50\%$ хода), то при возрастании регулируемой величины регулирующий орган начнет перемещаться в сторону закрытия.

Переходная характеристика П-регулятора аналогична таковой усилительного звена (рис. 10.6, б). Передаточная функция П-регулятора имеет вид

$$W(P) = \mu(P)/Y(P) = -S_1. \quad (10.7)$$

На характер переходного процесса в САР с П-регулятором значительно влияет предел пропорциональности регулятора (см. рис. 10.6). С уменьшением δ переходный процесс является колебательным, имеет малый коэффициент затухания и небольшую статическую ошибку ΔY (кривая 1, рис. 10.6). При оптимальном для данной САР пределе пропорциональности регулятора переходный процесс затухает быстро, однако статическая ошибка несколько больше (кривая 2). Если δ слишком велика, то переходный процесс может стать аperiodическим с большой статической ошибкой (кривая 3).

Настройка регулятора (см. рис. 10.5) на необходимую величину производится изменением соотношения плеч a и b рычага 3.

Пропорциональные регуляторы могут применяться для регулирования процессов, протекающих в объектах как обладающих, так и не обладающих самовыравниванием.

Системам автоматического регулирования с П-регуляторами свойственно наличие статической ошибки, т. е. остаточного отклонения регулируемой величины. Величина этого отклонения тем больше, чем больше изменение регулируемой величины и чем больше предел пропорциональности δ . Увеличивая коэффициент усиления регулятора, можно уменьшить статическую ошибку регулирования, однако полностью устранить ее нельзя.

10.5. ПРОПОРЦИОНАЛЬНО-ИНТЕГРАЛЬНЫЕ РЕГУЛЯТОРЫ (ПИ-РЕГУЛЯТОРЫ)

Пропорционально-интегральными называются регуляторы, изменение выходной величины которых пропорционально как изменению входной величины, так и интегралу ее изменения

$$\mu = - \left(S_1 Y + S_0 \int_0^t Y dt \right) \quad (10.8)$$

$$X_{\text{вых}} = - \left(S_1 X_{\text{вых}} + S_0 \int_0^t X_{\text{вых}} dt \right). \quad (10.9)$$

Это уравнение обычно записывают в такой форме

$$\mu = -1/\delta \left(Y + 1/T_i \int_0^t Y dt \right), \quad (10.9a)$$

где $1/\delta = S_1$ — коэффициент усиления регулятора, а $T_i = S_1/S_0$ — время интегрирования.

Эти две величины S_1 и T_i являются настроечными параметрами регулятора. Из уравнения (10.9) видно, что ПИ-регулятор совмещает П-регулятор и И-регулятор.

Для улучшения статических свойств ПИ-регуляторов их обратная связь осуществляется не по положению регулирующего органа, как в П-регуляторах, а по скорости его перемещения, т. е. используется гибкая обратная связь. Такая связь работает только в переходном режиме регулирования.

Таким образом, аналогично И-регулятору ПИ-регулятор поддерживает постоянное значение регулируемой величины независимо от нагрузки объекта, при отклонении ее от заданного значения в начальный момент времени переместит регулирующий орган на величину, пропорциональную величине отклонения (как П-регулятор), а затем будет продолжать перемещение регулирующего органа до исчезновения статической ошибки (за счет гибкой обратной связи), т. е. приведет регулируемую величину к заданному значению.

Следовательно, в пропорционально-интегральных регуляторах объединены преимущества как пропорциональных, так и интегральных регуляторов. Отрицательные свойства первых регуляторов перекрываются положительными свойствами вторых. На рис. 10.7 показана принципиальная схема гидравлического ПИ-регулятора. Работает регулятор следующим образом.

При нарушении равновесного состояния (например, при скачкообразном возрастании регулируемого давления в трубопроводе) подвижное дно сильфона 1 и поршень 3 золотника 4 переместятся вниз. Поршень 6 исполнительного механизма 7 будет подниматься вверх, увеличивая открытие регулирующего органа 5, и одновременно через шток 8, поршень 10 и цилиндр 9 перемещать вверх точку 0, сжимая пружину 12. Так как дроссель 11 препятствует быстрому перетеканию масла из одной камеры цилиндра 9 в другую, поршень 10 с цилиндром будут перемещаться вверх как одно целое. Одновременно с подъемом точки 0 рычаг 2 повернется по часовой стрелке вокруг точки С и возвратит поршень 3 золотника 4 в среднее положение. Регулирующий орган 5 и точка 0 займут новое положение, а регулируемое давление в трубопроводе будет иметь другое, отличное от первоначального значение. Пружина 12 бу-

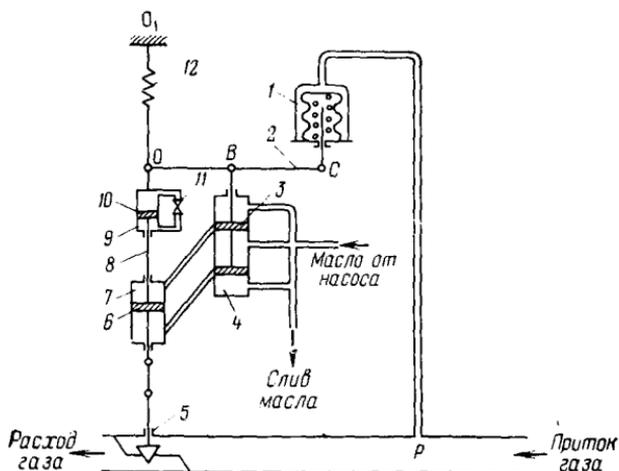


Рис. 10.7. Пропорционально-интегральный регулятор

дет сжата с некоторым запасом потенциальной энергии, проявляющейся в виде силы, приложенной к точке 0 и направленной сверху вниз. Таким образом, регулятор реализует пропорциональный закон регулирования. Но на этом его действие не заканчивается. Сила сжатия пружины, действующая на цилиндрок 9, повышает давление масла в камере под поршеньком, и масло начинает медленно перетекать через дроссель 11 из верхней камеры в нижнюю, где давление меньше. При этом поршеньок 10 остается неподвижным, а цилиндрок перемещается относительно поршенька вниз.

При движении поршенька и точки 0 вниз поршень золотника откроет отверстия, соединяющие золотник с исполнительным механизмом, и поршень последнего начнет подниматься вверх. Он будет подниматься до тех пор, пока пружина 12 не израсходует весь запас потенциальной энергии, т. е. пока точка 0 и поршень золотника не вернутся в первоначальное положение, а это возможно только при первоначальном значении регулируемого давления (при первоначальном положении точки С).

Итак, регулируемое давление возвращено к заданному значению, а регулирующий орган ПИ-регулятора открыт больше, чем у пропорционального регулятора.

Следовательно, действие регулятора можно расчленить на пропорциональное, протекающее практически мгновенно, и интегральное, при котором регулирующий орган продолжает перемещаться в том же направлении со скоростью, зависящей от степени открытия дросселя.

Статическая характеристика ПИ-регулятора показана на рис. 10.8, а. Пусть регулятор настроен так, что при изменении регулируемой величины Y от 20 до 80% шкалы регулирующий орган перемещается из одного крайнего положения в другое ($\delta = 60\%$), и пусть система находится в равновесном состоянии

при $Y=50\%$ и $\mu=50\%$ (точки 1 и 2). При возрастании регулируемой величины до 60% (точка 3) под воздействием пропорциональной части регулятора регулирующий орган переместится в точку 4 (примерно 68% своего хода), а затем начнет медленно действовать интегральная часть, которая возвратит регулируемую величину к заданному значению (точка 5), действие регулятора прекратится при новом положении регулирующего органа (точка 6), соответствующем примерно 73% полного хода.

Поскольку в процессе работы регулятора предел пропорциональности не изменяется, можно сделать вывод о том, что интегральная часть регулятора как бы перемещает статическую характеристику параллельно самой себе (штриховая линия).

Передаточная функция ПИ-регулятора имеет вид

$$W(P) = -(S_0/P \cdot S_1). \quad (10.10)$$

Переходная характеристика ПИ-регулятора показана на рис. 10.8, б. Из переходной характеристики видно, что реакция регулятора на скачкообразное уменьшение регулируемой величины имеет две части. В первой части регулирующий орган резко перемещается до точки a (действует пропорциональная часть), во второй части он перемещается с постоянной скоростью (линия ab ; действует интегральная часть).

На рис. 10.8, в показаны кривые переходных процессов САР с ПИ-регулятором при различных настройках регулятора δ и T_i : при слишком малом значении δ или слишком малом значении T_i — кривая 1; кривая 2 изображает переходный процесс при оптимальных настройках регулятора; кривая 3 соответствует переходному процессу при слишком большом значении δ или слишком большом значении времени интегрирования.

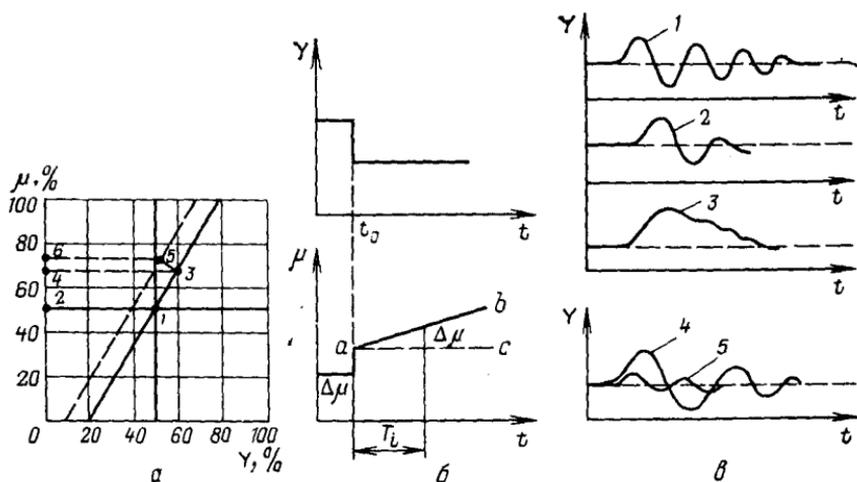


Рис. 10.8. Характеристики ПИ-регулятора и системы регулирования: a — статическая; b — переходная; $в$ — переходные процессы САР с ПИ-регулятором

Из сравнения качества регулирования САР при использовании И-регулятора и ПИ-регулятора (кривые 4 и 5 соответственно) видно, что оно лучше при использовании ПИ-регулятора.

10.6. РЕГУЛЯТОРЫ С ПРЕДВАРЕНИЕМ

Регуляторы с предварением бывают двух видов: ПД-пропорционально-дифференциальные и ПИД-пропорционально-интегрально-дифференциальные.

ПД-регулятором (пропорциональным регулятором с предварением) называют такой регулятор, регулирующее воздействие которого пропорционально отклонению регулируемой величины и скорости этого отклонения. Поскольку скорость изменения входной величины является ее производной и характеризует тенденцию ее изменения, воздействие регулятора, пропорциональное производной, как бы предваряет значительные отклонения регулируемой величины.

Регулирующий орган регуляторов с предварением перемещается с некоторым опережением, пропорциональным скорости изменения регулируемой величины. С уменьшением скорости изменения опережающее действие регулятора также уменьшается и полностью прекращается в равновесном состоянии. Регулирующее воздействие пропорционального регулятора с предварением имеет вид

$$\mu = (1/\delta) Y + T_n (dY/dt) \quad (10.11)$$

или

$$X_{\text{вых}} = (1/\delta) X_{\text{вх}} + T_n (dX_{\text{вх}}/dt), \quad (10.12)$$

где T_n — время предварения.

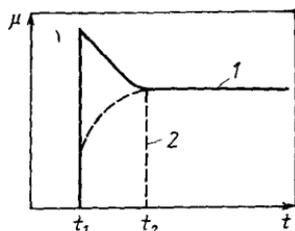
Выходная величина представляет собой сумму пропорционального воздействия и воздействия по производной. ПД-регулятор имеет два настроечных параметра: предел пропорциональности и *время предварения*.

Переходная характеристика пропорционального регулятора с предварением показана на рис. 10.9. Она отличается от переходной характеристики П-регулятора резким увеличением выходной величины μ в начальный период скачкообразного изменения регулируемой величины Y . Затем с течением времени значение выходной величины уменьшается и к моменту t_2 достигает постоянного значения, соответствующего настройке предела пропорциональности. Таким образом, действие предварения можно физически представить как временное увеличение коэффициента усиления регулятора.

Временное увеличение коэффициента усиления называется *прямым предварением* и применяется в регуляторах, устанавливаемых на инерционных объектах с большим запаздыванием. На объектах с малым запаздыванием, характеризующих частыми и быстрыми изменениями нагрузки, применяют ПД-регуля-

Рис. 10.9. Переходные характеристики ПД-регулятора:

1 — с прямым предварением; 2 — с обратным предварением



торы с *обратным предварением*. Действие обратного предварения сводится к временному уменьшению коэффициента усиления регулятора. Переходная характеристика ПД-регулятора с обратным предварением показана на рис. 10.9 штриховой линией.

ПИД-регуляторами пропорционально-интегрально-дифференциальными (ПИ-регулятор с предварением) — называются такие, регулирующие воздействие которых пропорционально отклонению регулируемой величины, интегралу и скорости этого отклонения. Уравнение этих регуляторов имеет вид

$$\mu = - \left(S_1 Y + S_0 \int_0^t Y dt + S_2' (dY/dt) \right) \quad (10.13)$$

или

$$X_{\text{вых}} = - \left(S_1 X_{\text{вх}} + S_0 \int_0^t X_{\text{вх}} dt + S_2 (dX_{\text{вх}}/dt) \right). \quad (10.14)$$

ПИД-регуляторы имеют устройства для изменения трех настроечных параметров $1/\delta$, T_n и T_p .

Следует иметь в виду, что изменение одной настройки регуляторов некоторых конструкций влечет за собой изменение других настроек.

На рис. 10.10 показана переходная характеристика ПИД-регулятора с прямым предварением. Часть характеристики на отрезке времени от t_1 до t_2 указывает на преобладание пропорциональной и дифференциальной составляющих, а с момента t_2 участок характеристики, представленный прямой линией, является суммой пропорциональной и интегральной составляющих.

Устройства предварения, создающие воздействие по производной, различны по принципу действия и по месту расположения среди других элементов систем автоматического регулирования. Они могут находиться как в измерительной, так и в регулирующей частях системы.

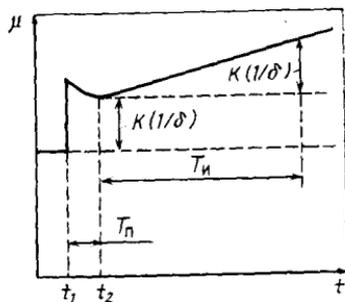


Рис. 10.10. Переходная характеристика ПИД-регулятора с прямым предварением

КОНСТРУКЦИИ И ХАРАКТЕРИСТИКИ СЕРИЙНЫХ СРЕДСТВ АВТОМАТИЗАЦИИ

Отечественная промышленность выпускает автоматические регуляторы для регулирования различных технологических параметров, различные исполнительные механизмы и вспомогательные устройства. Серийно выпускаются регуляторы как прямого, так и косвенного действия.

11.1. РЕГУЛЯТОРЫ ПРЯМОГО ДЕЙСТВИЯ

Регуляторы прямого действия нашли широкое применение для регулирования температуры, давления, уровня и некоторых других технологических параметров. Их отличительная особенность — простота конструкции, а следовательно, высокая надежность и малые трудовые затраты при эксплуатации. Основным недостатком — большие погрешности. На рис. 11.1 показана конструкция регулятора температуры типа РТ прямого действия. Эти регуляторы выпускаются двух модификаций РТ-ДО и РТ-ДЗ. Они предназначены для поддержания температуры регулируемой среды в интервале $0-180^{\circ}\text{C}$, что достигается изменением расхода теплоносителя. Принцип действия регуляторов основан на изменении объема жидкости в термобаллоне при изменении температуры регулируемой среды. Регуляторы состоят из двух основных узлов — термосистемы типа РТ и регулирующего органа типа ДО (давление открывает) или ДЗ (давление закрывает), т. е. регуляторы РТ изготавливают с прямыми или обратными клапанами. Прямые клапаны (ДО) применяют тогда, когда регулируется температура греющего вещества. В этом случае при повышении температуры регулируемой среды клапаны закрываются. При регулировании температуры охлаждающего вещества применяют обратные клапаны, закрывающиеся при понижении температуры регулируемой среды (на рис. 11.1 показана схема регулятора с прямым клапаном). Термосистема содержит термобаллон, задатчик и исполнительный механизм.

Задатчик состоит из сильфона настройки 1, пружины 4, штока 2, ручки 5 и шкалы 3. Исполнительный механизм состоит из сварного сильфона 7 со штоком 8 и корпуса 9. Термобаллон и исполнительный механизм, соединенные капиллярной трубкой 6, заполнены толуолом (C_7H_8) или ксилолом (C_8H_{10}) и герметично закрыты заглушкой.

Регулирующий орган состоит из корпуса 12, в котором закреплено седло 14, клапана 13 со штоком 15, сильфона разгрузки 11, пружины возврата 16 и гайки настройки 10. Настройка регуляторов на заданную температуру производится по шкале 3 вращением ручки 5. При вращении ручки изменяется объем

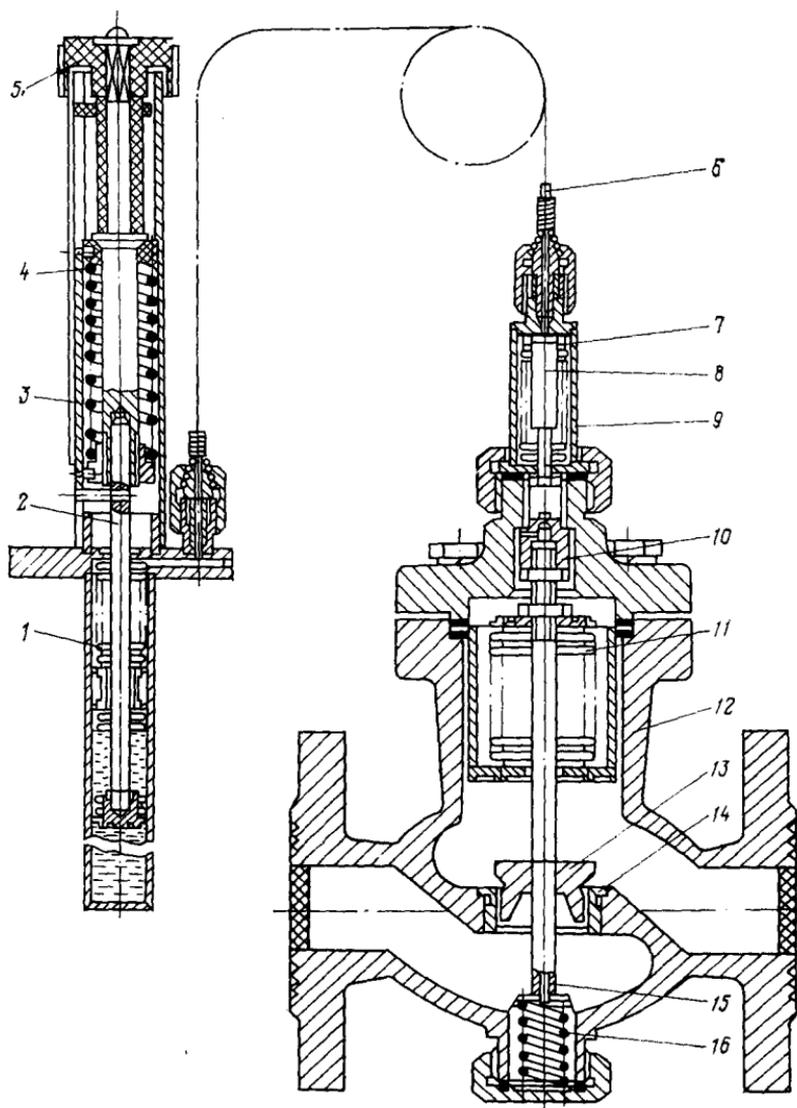


Рис. 11.1. Регулятор температуры прямого действия типа РТ

герметичной полости термосистемы, что приводит к изменению температуры начала трогания клапана.

Регуляторы эксплуатируются при температуре окружающего воздуха от -30 до 50 °С.

11.2. ПНЕВМАТИЧЕСКИЕ РЕГУЛЯТОРЫ

Пневматическими называют регуляторы, действие которых основано на использовании энергии сжатого воздуха. Следовательно, они относятся к регуляторам косвенного (непрямого

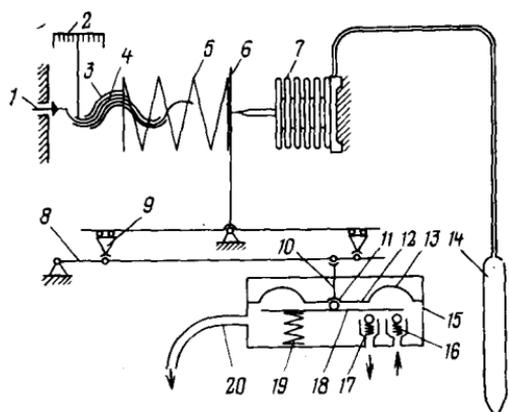


Рис. 11.2. Принципиальная схема регулятора температуры типа ТРР:

1 — винт регулировочный; 2 — шкала; 3 — гайка; 4 — винт диапазона; 5 — пружина диапазона; 6, 8 — рычаг; 7 — сильфон; 9 — узел пропорциональности; 10 — шток пневмореле; 11 — опорный шарик пневмореле; 12 — жесткий центр мембраны; 13 — мембрана; 14 — термобаллон; 15 — пневмореле; 16, 17 — клапан пневмореле; 18 — рычаг пневмореле; 19 — пружина пневмореле; 20 — канал

действия). Рабочей средой является очищенный воздух давлением 20—100 кПа (0,2—1,0 кгс/см²).

Отечественная приборостроительная промышленность серийно выпускает системы пневмоавтоматики как приборного типа (измерительное и регулирующее устройство находятся в одном корпусе), так и системы, собираемые из отдельных элементов промышленной пневмоавтоматики (УСЭППА).

Регуляторы температуры приборного типа. Для регулирования температуры в трубопроводах, воздушных каналах и производственных помещениях выпускают регуляторы температуры пневматические типа ТРП (рис. 11.2).

Регуляторы типа ТРП — пропорционального действия. Их конструкция обеспечивает возможность настройки на «прямое» и «обратное» действие. При изменении температуры контролируемой среды изменяется давление в термосистеме, которое через сильфон 7, преодолевая сопротивление пружины диапазона 5, действует на главный рычаг 6, который через узел пропорциональности 9 и рычаг 8 передает усилие на шток 10 пневмореле и мембрану 13.

При совпадении заданной температуры с действительной вся система находится в равновесии, оба клапана пневмореле 16 и 17 закрыты. При увеличении давления на шток 10 открывается клапан 16, к которому подведено рабочее давление от сети; в камере пневмореле появляется давление управления, возрастающее от 0,02 до 0,1 МПа (0,2 до 1 кгс/см²) пропорционально увеличению температуры. Через канал 20 это давление передается на исполнительный механизм. При разгрузке штока 10 открывается стравливающий клапан 17. Воздух из камеры пневмореле через клапан 17 стравливается в атмосферу.

Регуляторы системы «Старт». При автоматизации производственных процессов широко используют пневматические регуляторы системы «Старт». Приборы этой системы построены из набора унифицированных элементов УСЭППА. Каждый элемент УСЭППА представляет собой законченную конструкцию, обеспе-

чивающую простейшие операции — сравнение, запоминание, повторение, суммирование, а также выполняющую функции пневматического реле, пневмосопротивления, пневмемкости, пневмопереключателя и т. п.

Широкие функциональные возможности УСЭППА позволили создать обширный комплекс приборов различной сложности — от простейших позиционных регуляторов до систем оптимального управления производственными процессами. Работа всех приборов системы «Старт» основана на принципе компенсации усилий, создаваемых давлением воздуха, при котором перемещения подвижных элементов близки к нулю. Ниже приведена общая характеристика приборов системы «Старт»:

Диапазон изменения входных и выходных сигналов, МПа	0,02 — 0,1
Дискретные сигналы, соответствующие давлению, МПа:	
0	От 0 до 0,01
1	» 0,11 до давления питания
Давление питания, МПа	0,14 ± 0,014
Температура окружающей среды, °С	От 5 до 50
Влажность окружающей среды, %	» 30 » 80

Приборы системы «Старт» являются центральной частью пневматической ветви Государственной системы приборов (ГСП).

Все приборы системы «Старт» могут работать с любыми устройствами, входные и выходные сигналы которых являются унифицированными пневматическими. Регуляторы системы «Старт» позволяют реализовать все известные законы регулирования технологических параметров.

Ниже рассматриваются условные обозначения и принципиальные схемы некоторых элементов УСЭППА, а также принципиальные схемы и конструкции регуляторов. Условные изображения некоторых элементов УСЭППА показаны на рис. 11.3.

Пятимембранный элемент сравнения. Предназначен для непрерывного сравнения до четырех непрерывных пневматических сигналов, поступающих от измерительных приборов или от других устройств, и получения на выходе дискретного сигнала 0 или 1.

Элемент (рис. 11.4) состоит из пяти мембран, соединенных между собой штоком. Мембраны с корпусом образуют шесть пневматических камер. В камеру *E* подводится воздух питания, камера *A* сообщается с атмосферой, а в камеры *D*, *Г*, *B*, *Б* под-

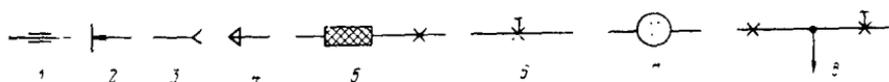


Рис. 11.3. Условные изображения некоторых узлов элементов УСЭППА:

1 — жесткая мембрана с жестким центром; 2 — сопло заслонки; 3 — питание; 4 — атмосфера; 5 — постоянный дроссель с фильтром; 6 — регулируемый дроссель; 7 — пневмемкость; 8 — делитель давления

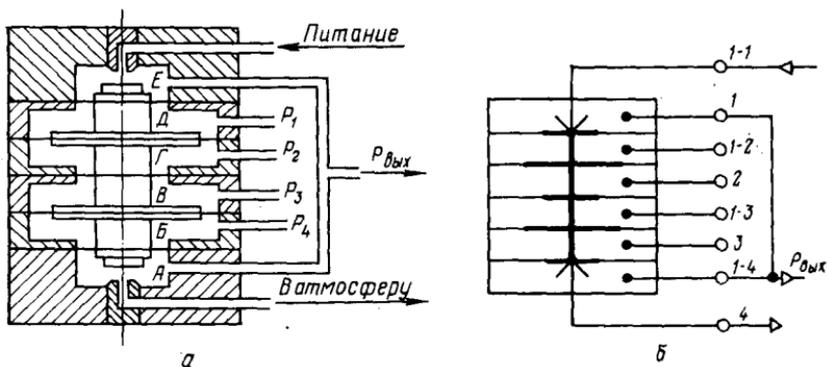


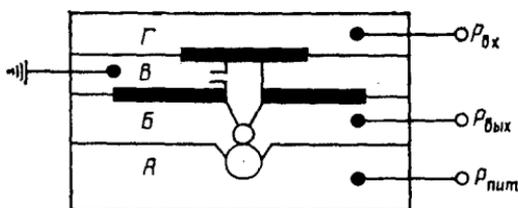
Рис. 11.4. Пятимембранный элемент сравнения:

a — конструкция; *б* — принципиальная схема; А—Е — камеры; 1—4; 1-1, 1-2, 1-3, 1-4 — вводы

водятся сравниваемые давления P_1, P_2, P_3, P_4 . В отсутствие равенства между этими давлениями давление на выходе элемента принимает значение 0 или 1, в зависимости от знака рассогласования сравниваемых давлений. Положение металлического штока, торцовые части которого играют роль заслонок, зависит от значений сравниваемых или складываемых сигналов. Давление обратной связи (камеры А и Е) создают усилие, уравновешивающее суммарное усилие от входных давлений.

Усилитель мощности. Предназначен для выдачи пневматического сигнала, усиленного по мощности (рис. 11.5). Сжатый воздух, поступающий в камеру Г (на вход усилителя), воздействует на мембраны, которые управляют шариковым клапаном, обеспечивая повышение давления в выходной камере Б. На выходе усилителя устанавливается давление, равное входному, что обусловлено большим расходом воздуха в выходной линии.

На рис. 11.6 показана принципиальная схема задатчика, предназначенного для стабилизации давления сжатого воздуха, подаваемого обычно в глухие камеры регулирующих или других устройств пневмоавтоматики. Задатчик состоит из двух камер А и Б, отделенных одна от другой гибкой мембраной 3, жесткий центр которой служит заслонкой выпускного сопла 4, через которое воздух питания выходит в атмосферу. Установка заданного давления $P_{\text{вых}}$ производится при помощи настроенного винта 1, при повороте которого изменяется натяжение пружины 2 и соответственно положение заслонки относительно сопла.

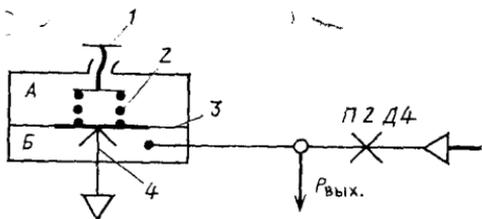


Для создания инерционных звеньев в пневматических линиях и устройствах применяют эле-

Рис. 11.5. Принципиальная схема усилителя мощности: А, Б, В, Г — камеры

Рис. 11.6. Принципиальная схема задатчика:

А, Б — мембраны; 1 — настроечный винт; 2 — пружина; 3 — мембрана; 4 — сопло



менты емкости. На рис. 11.7 показана емкость, вместимость которой 50 см³. Выпускается также пневмочемкость вместимостью 40 см³.

Автоматические регуляторы системы «Старт» обозначаются буквами ПР, что означает пневматический регулятор.

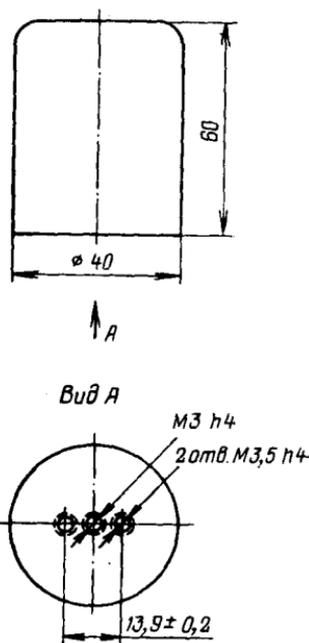
Позиционный регулятор типа ПР1.5. Предназначен для двухпозиционного регулирования и может быть использован в качестве сигнализатора.

Действие позиционного регулятора основано на сравнении давления, поступающего на вход от измерительного прибора, пропорционального измеряемому параметру, и давления задания, устанавливаемое задатчиком, встроенным в прибор. Эти давления создают на мембранах элемента сравнения усилия, направленные в противоположные стороны. Результирующая усилий при изменении регулируемого параметра выше или ниже заданного значения (в зависимости от вида настройки — на максимум или минимум) вызывает перемещение узла мембран, в результате которого с выходом соединяется либо сопло питания, либо сопло, открытое в атмосферу.

Принципиальная схема регулятора типа ПР1.5 показана на рис. 11.8. Регулятор состоит из элементов аналоговой техники: трехмембранного элемента сравнения 3, задатчика 1, усилителя мощности 4 и пневматического сопротивления — постоянного дросселя 2. Настройка прибора на максимум или минимум производится переключением выходных каналов.

Давление задания P_3 , установленное задатчиком 1, подводится к камере B_3 . Пока входное давление больше давления задания, сопло $C_Г$ закрыто, и сигнал на выходе элемента сравнения (через сопло $C_Д$) равен 0. Как только входной сигнал станет меньше заданного, сопло $C_Г$ откроется, и на выходе сформируется сигнал 1.

Рис. 11.7. Принципиальная схема пневмочемкости



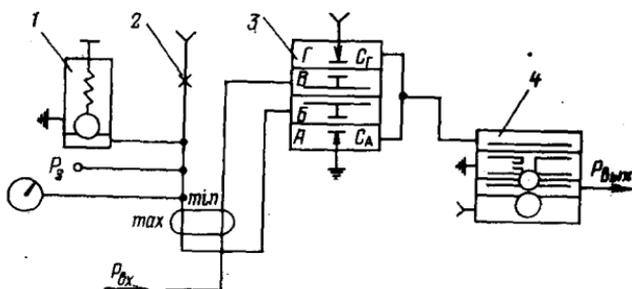


Рис. 11.8. Принципиальная схема регулятора типа ПР1.5

В положении максимум давление задание подается в камеру B_3 , а давление от измерительного блока в камеру B_3 . Если $P_{вх}$, изменяясь, останется меньше P_3 , сопло $C_Г$ закрыто; сигнал на выходе равен 0. При $P_{вх} > P_3$ сопло $C_Г$ открывается и на выходе элемента сравнения появляется сигнал 1.

Требуемая величина задания достигается вращением винта задатчика, в который подается питание через дроссель. Контроль ведут по манометру. Выходное давление усиливается по мощности элементом 4.

Элементы регулятора монтируются при помощи винтов на плате из органического стекла. Связь между элементами осуществляется через отверстия в них и каналы в плате. Для подключения прибора к штуцерам внешних пневмолиний применяется гибкий шланг.

Плата крепится к металлической рамке, которая закрепляется на основании прибора. Кожух, закрывающий регулятор, выполнен из ударопрочного полистирола.

Пропорциональный регулятор типа ПР2.5. Предназначен для автоматического поддержания регулируемого параметра на заданном уровне в результате обработки непрерывного пропорционального регулирующего воздействия, посылаемого на исполнительный механизм.

Сигналы, поступающие от задатчика и измерительного прибора (датчика), воздействуют на мембраны элемента сравнения, выходное давление которого изменяется при рассогласовании давлений задания и параметра. Разность сил от воздействия давлений задания и параметра уравнивается силами, создаваемыми давлением отрицательной обратной связи и давлением настройки. Степень воздействия отрицательной обратной связи определяется настройкой регулируемого дросселя предела пропорциональности δ .

Регулятор типа ПР2.5 (рис. 11.9) состоит из аналоговых элементов: двух пятимембранных элементов сравнения 1 и 5, усилителя мощности 6, задатчика 2. Кроме того, в него входит один дискретный элемент (выключающее реле 7) и пневматические сопротивления (регулируемый дроссель δ 3 и постоянные дроссели 4 и ПД).

Зависимость выходного сигнала (регулирующего воздействия) от сигнала рассогласования ($P_n - P_3$) в пропорциональном регуляторе типа ПР2.5 имеет следующий вид:

$$P_{\text{вых}} = K (P_n - P_3) + P_n, \quad (11.1)$$

где K — коэффициент пропорциональности, равный $1/8 \cdot 100\%$; P_n — давление настройки (уровень регулирования).

Таким образом, предел пропорциональности настраивается изменением проводимости α регулируемого дросселя 3. Выходное давление с элемента 5 поступает на вход усилителя мощности в камеру Γ_6 , а затем через сопло C_2 выключающего реле 7 — на выход регулятора.

Выключающее реле 7 служит для отключения регулятора (при переходе на ручное управление) подачей давления питания P_k в камеру B_7 , при этом сопло C_2 закрывается, а сопло C_1 заглушено. Автоколебания, возникающие при нарушении схемы равновесия, затормаживаются встроенным в ножку элемента 5 постоянным дросселем ПД, включенным в линию положительной обратной связи (камера B_5). Монтаж элементов регулятора такой же, как и у ПР1.5.

Пропорционально-интегральный регулятор типа ПР3.21. ПИ-регулятор типа ПР3.21 предназначен для автоматического поддержания регулируемого параметра на заданной величине, что достигается обработкой непрерывного пропорционально-интегрального регулирующего воздействия, посылаемого на исполнительный механизм.

Регулятор состоит из пропорционального и интегрального звеньев (рис. 11.10). Пневматические сигналы, поступающие от измерительного прибора (датчика) P_n и от задатчика P_3 воздействуют на мембраны элементов сравнения обоих звеньев. Разность сил от действия давлений задания и параметра уравновешивается силами, создаваемыми давлениями отрицательной и положительной обратных связей.

При наличии рассогласования $P_n - P_3$ каждое из звеньев вносит соответствующую составляющую в общее регулирующее

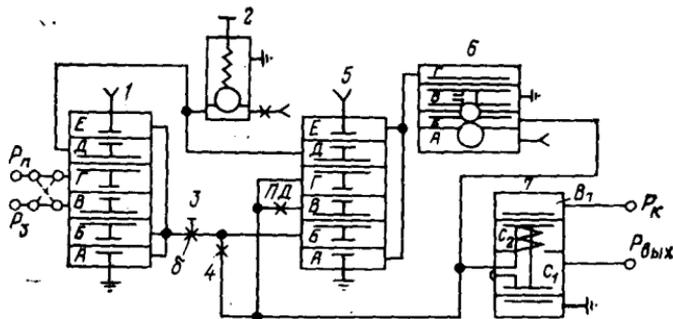


Рис. 11.9. Принципиальная схема П-регулятора типа ПР2.5

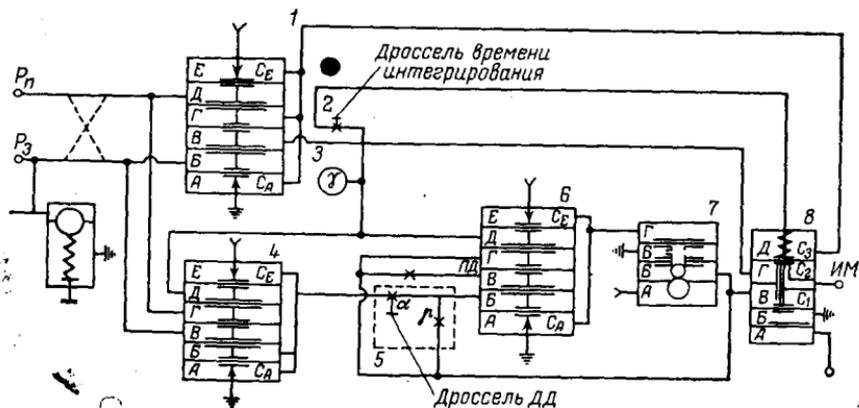


Рис. 11.10. Принципиальная схема ПИ-регулятора типа ПР3.21:

1, 4, 6 — пятимембранные элементы сравнения; 2 — регулируемый дроссель; 3 — пневмоемкость; 5 — постоянный дроссель; 7 — усилитель мощности; 8 — выключающее реле

воздействии прибора. Пропорциональная составляющая регулятора вводится воздействием на отрицательную обратную связь, а интегральная составляющая — воздействием на положительную обратную связь.

Регулятор состоит из аналоговых элементов: трех пятимембранных элементов сравнения 1, 4, 6 и усилителя мощности 7. Кроме того, в него входит один дискретный элемент (трехклапанное выключающее реле, пневматические сопротивления), регулируемый 2, 5 и постоянный ПД дроссели и емкость 3.

Зависимость выходного сигнала от сигнала рассогласования в пропорционально-интегральном регуляторе имеет следующий вид:

$$P_{\text{вых}} = K (P_{\text{н}} - P_{\text{з}}) + (1/T) \int_0^t (P_{\text{н}} - P_{\text{з}}) dt, \quad (11.2)$$

где K — коэффициент пропорциональности, $K = (1/ДД) 100$. %; T — постоянная времени интегрирования.

Рассмотрим получение этой зависимости по схеме регулятора (см. рис. 11.10).

В пропорциональное звено регулятора входят мембранный элемент сравнения 4, регулируемый дроссель 5 и постоянный дроссель (сумматор); в интегральное — мембранный элемент сравнения 1, регулируемый дроссель 2 и емкость 3. Интегральное звено обрабатывает интеграл по времени от величины рассогласования $P_{\text{н}} - P_{\text{з}}$

$$P_{\text{н}} = (1/T) \int_0^t (P_{\text{н}} - P_{\text{з}}) dt. \quad (11.3)$$

Работу пропорционального звена можно проследить при закрытом дросселе времени интегрирования 2. Выход мембранного элемента сравнения 4 равен

$$P_4 = P_3 - P_{II} + P_{II}. \quad (11.4)$$

В момент равновесия давление в камере B_6 равно давлению в камерах D_6 и D_4 , т. е. P_{II} . Обозначив проводимости дросселей сумматора через α (регулируемого) и γ (постоянного), найдем давление в камере B_6 в момент равновесия

$$P_{B_6} = (\alpha P_4 + \gamma P_{\text{вых}}) / (\alpha + \gamma) = P_{II}. \quad (11.5)$$

Подставив в формулу (11.5) P_4 из уравнения (11.4) и заменив отношение проводимостей дросселей коэффициентом K , получим выражение (11.2).

Настройка коэффициента пропорциональности K производится изменением проводимости α регулируемого дросселя $ДД$. При закрытом дросселе коэффициент K минимальный, т. е. $K \rightarrow 0$, а $ДД = (1/K) 100 \rightarrow \infty$ и наоборот.

Время интегрирования настраивается дросселем 2. Когда дроссель 2 закрыт, оно достигает максимума, а регулятор при этом превращается в пропорциональный. Минимальное время интегрирования соответствует полностью открытому дросселю 2.

Из уравнения (11.2) видно, что в отличие от других пропорционально-интегральных регуляторов регулятор ПРЗ.21 имеет развязанную настройку времени интегрирования и $ДД$.

Выходное давление P_6 , отрабатываемое элементом 6, поступает на вход усилителя мощности в камеру Γ_7 , а затем на трехклапанное реле в камеру B_8 .

При автоматическом регулировании давление команды на трехклапанное реле $P_K = 0$, с выходной камерой через сопло C_1 соединяется камера B_8 , в которую поступает давление от усилителя 7. Под действием пружины открыто сопло в камере $D_8 - C_3$, через которое дроссель 2 соединяется с выходом элемента сравнения 1.

С переходом на ручное управление процессом в трехклапанное реле 8 подается команда $P_K = 1$, вызывающая закрытие сопла C_1 и разъединение камеры B_8 и выходной, открытие сопла C_2 и закрытие сопла C_3 , при этом с линией исполнительного механизма ($ИМ$) соединяется камера Γ_8 и в камерах положительной обратной связи B_1 , D_4 и D_6 устанавливается давление (равное давлению на исполнительном механизме), подготавливающее регулятор к плавному переходу на автоматическое регулирование.

В схеме прибора дроссель времени интегрирования 2 соединяется с выходом элемента сравнения 1 только в том случае, если открыто сопло C_3 реле 8, т. е. при автоматическом регулировании.

Такая реализация схемы регулятора предохраняет линию исполнительного механизма от скачка давления в переходных режимах, когда изменение давления задания P_3 вызывает резкое изменение выходного давления элемента I .

Для получения ПД- и ПИД-регуляторов в системе «Старт» используется дифференцирующий блок (блок предварения типа ПФ2.1), который включается последовательно с рассмотренными выше регуляторами.

В XII пятилетке предусмотрены к массовому выпуску модернизированные регуляторы системы «Старт». Обозначения модернизированного регулятора установлены с добавлением индекса М1. Например, ПР1М1, ПР2.1М1; ПР3.31М1 и т. д.

Выпускаются следующие вторичные приборы типов: ПВ10.1Э, ПВ10.2Э; ПВ10.1П; ПВ10.2П; ПВ3.2.

Вторичный прибор ПВ10.1Э имеет три измерительных устройства сильфонного типа. Он относится к самопишущим приборам и осуществляет непрерывную запись на диаграмме и показание на неподвижной шкале величины регулируемого параметра, т. е. сигнала от датчика ($P_{вх}$), показание величины сигнала задания P_3 ; показание величины давления воздуха $P_{вых}$ на выходе регулятора (т. е. в линии, соединяющей регулятор с исполнительным механизмом).

Прибор ПВ4.2Э предназначен для измерения и регистрации одной величины; ПВ4.3Э — для измерения и регистрации двух величин.

В указанных приборах для перемещения диаграммной бумаги предусмотрен электрический синхронный двигатель. В приборах ПВ4.2П, ПВ4.3П и ПВ10.1П привод диаграмм пневматический.

К показывающим вторичным приборам относятся:

ПВ1.3 — предназначен для измерения и показания одного параметра;

ПВ2.2 — для измерения и показания величины одного параметра и сигнализации в случае его отклонения от двух крайних заданных значений;

ПВ3.2 — вторичный прибор со станцией управления, предназначенный для работы в схемах регулирования и осуществляющий показание величины регулируемого параметра, показание сигнала задания и величины давления на выходе регулятора.

Вторичный прибор ПВ9.4П предназначен для суммирования количества продукта за определенный промежуток времени. Схема одного измерительного устройства показана на рис. 2.7 (см. гл. 2).

Во вторичный прибор ПВ10.1Э встроена панель управления, обеспечивающая ручное управление, автоматическое регулирование и автоматическое программное регулирование, при котором переменный пневматический сигнал задания поступает от специального программного задатчика. Плавный переход с од-

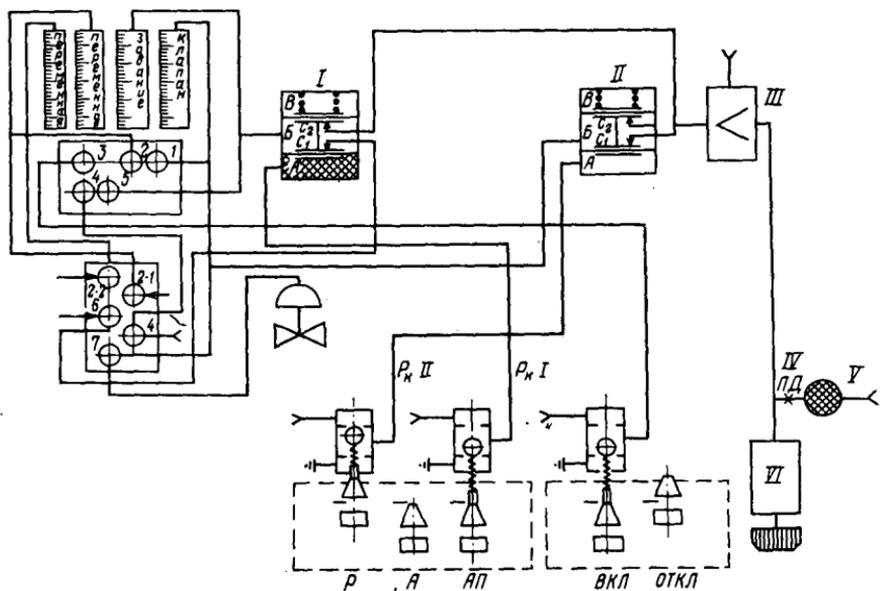


Рис. 11.11. Схема станции управления в промежуточном положении:
 I, II — выключающие реле; III — усилитель мощности; IV — постоянный дроссель; V — фильтр; VI — датчик; 1—7 — штуцера регулятора и вторичного прибора

ного режима на другой, а также пуск и выключение регулятора производится при помощи пяти кнопок. Для переключения потоков воздуха используются дискретные элементы УСЭППА — выключающие реле.

Рассмотрим принципиальную схему станции управления в промежуточном положении (рис. 11.11), которое возникает при переходе с ручного дистанционного управления исполнительным механизмом на автоматическое регулирование.

До включения регулятора сначала следует нажать кнопку А (автомат), при этом кнопка Р (ручное) займет исходное положение (опущенное). Затем при отключенном регуляторе следует, используя датчик, установить сигнал задания, равный значению регулируемой величины; при этом значения сигналов контролируются по соответствующим шкалам. При нажатой кнопке А и опущенной кнопке Р воздух закрывает сопло С₁ реле 2, перекрывая линию воздуха, идущего от датчика к исполнительному механизму. Датчик оказывается связанным только с камерой задания регулятора через сопло С₂ и камеру В реле 1. Таким образом регулятор подготовлен к включению.

11.3. ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА ПНЕВМАТИЧЕСКИХ РЕГУЛЯТОРОВ

Исполнительные устройства являются составной частью любой системы автоматического регулирования. Они разнообразны по конструкции, но все состоят из двух частей: исполнительного механизма и регулирующего органа.

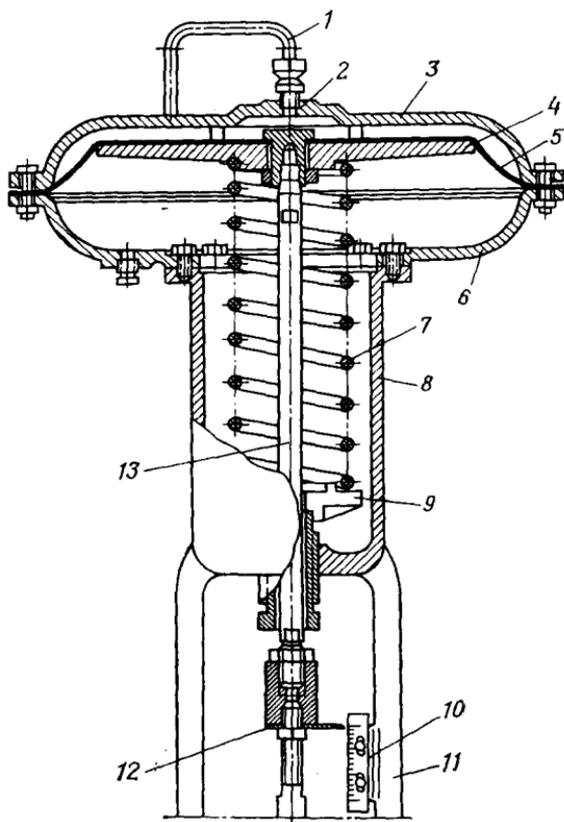


Рис. 11.12. Схема мембранного исполнительного механизма

Исполнительные механизмы. Предназначены для работы с любым пневматическим регулятором, выпускаются в основном мембранного (мембранно-пружинного) и поршневого типов.

Мембранный исполнительный механизм (рис. 11.12) представляет собой преобразователь давления сжатого воздуха в пропорциональное перемещение выходного элемента (штока, рычага) при относительно небольшой величине этих перемещений (от 6 до 100 мм). Он состоит из верхней 3 и нижней 6 крышек, между которыми помещена эластичная мембрана 5. Под мембраной расположен металлический диск 4, являющийся жестким центром мембраны. Он опирается на пружину 7, помещенную в корпус 8. Нижний конец пружины опирается на опору 9. В центре диска 4 закреплен шток 13. Кронштейн 11 служит для крепления исполнительного механизма к корпусу регулирующего органа. Через отверстие 2 в крышке 3 в камеру под мембраной по импульсной трубке 1 подается сжатый воздух от регулятора. Камера под мембраной сообщена с атмосферой. Механизм преобразует давление воздуха, поступающего в камеру

над мембраной, в усилие, сжимающее пружину 7, и в линейное перемещение штока 13, положение которого указывается стрелкой 12 на шкале 10.

В отсутствие давления воздуха в камере над мембраной пружина 7 через жесткий центр прижимает мембрану 5 к выступам верхней крышки 3. Шток 13 занимает крайнее верхнее положение. Давление воздуха в камере над мембраной может изменяться от атмосферного до 0,1 МПа. При давлении воздуха 0,1 МПа сжатие пружины будет максимальным, и шток будет находиться в крайнем нижнем положении. При снижении давления воздуха в камере над мембраной пружина разожмется и переместит подвижную систему механизма вверх на величину, при которой установится новое равновесие сил.

На рис. 11.13 показана статическая характеристика мембранного исполнительного механизма (МИМ). Допустимая разность значений между прямым и обратным ходами $\Delta\mu$ не должна превышать 2% полного хода штока. На величину гистерезиса большое влияние оказывают силы трения в сальнике штока регулирующего органа. Исполнительные механизмы выпускают с мембранами, диаметр заделки которых находится в пределах 125—500 мм. Они могут комплектоваться с позиционерами и ручными дублерами.

Позиционеры предназначены для создания дополнительных усилий на штоке исполнительного механизма при появлении на регулирующем органе больших неуравновешенных усилий. Они обеспечивают повышенное быстродействие и точность установки штока.

На рис. 11.14 показана принципиальная схема позиционера с мембранным чувствительным элементом. Пневматический сиг-

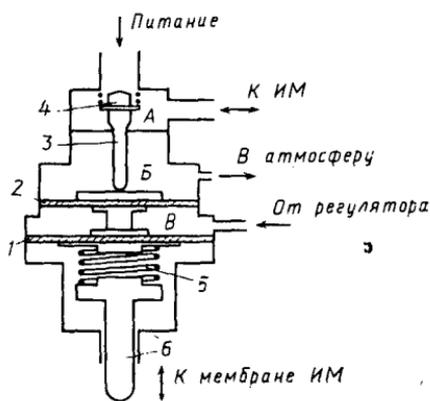
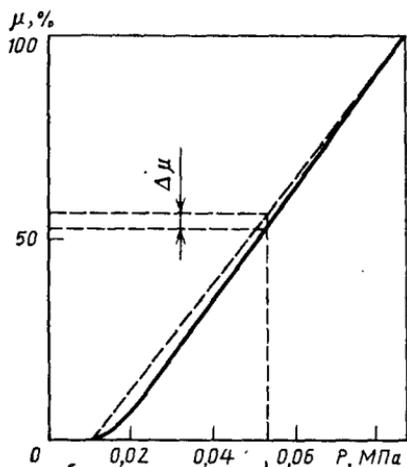


Рис. 11.13. Статическая характеристика мембранного исполнительного механизма (μ — перемещение штока)

Рис. 11.14. Принципиальная схема позиционера

нал от регулятора поступает в глухую камеру *B*, образованную мембранами *1* и *2*, собранными в один блок. Площадь мембраны *1* больше площади мембраны *2*. На жесткий центр мембраны *2* опирается хвостовик *3* двойного конического клапана *4*. Последний изменяет сечение двух отверстий в камере *1*, создавая два дросселя переменного сечения: на притоке воздуха питания в камеру *A* и на выходе воздуха из камеры *A* через камеру *B* в атмосферу. Камера *A* соединяется с исполнительным механизмом. Пружина *5* и шток *6* создают отрицательную обратную связь. При установке позиционера на исполнительном механизме шток *6* входит в отверстие верхней или нижней крышки и соприкасается с жестким центром мембраны.

При неизменной величине пневматического сигнала, поступающего от регулятора, мембранный блок неподвижен, и давление в камере *A* не изменяется. При увеличении пневматического сигнала мембранный блок перемещается вниз вследствие неравенства площадей мембран *1* и *2* и сжимает пружину *5*. Одновременно с мембранным блоком перемещается вниз и двойной конический клапан *4*, в результате этого приток воздуха в ка-

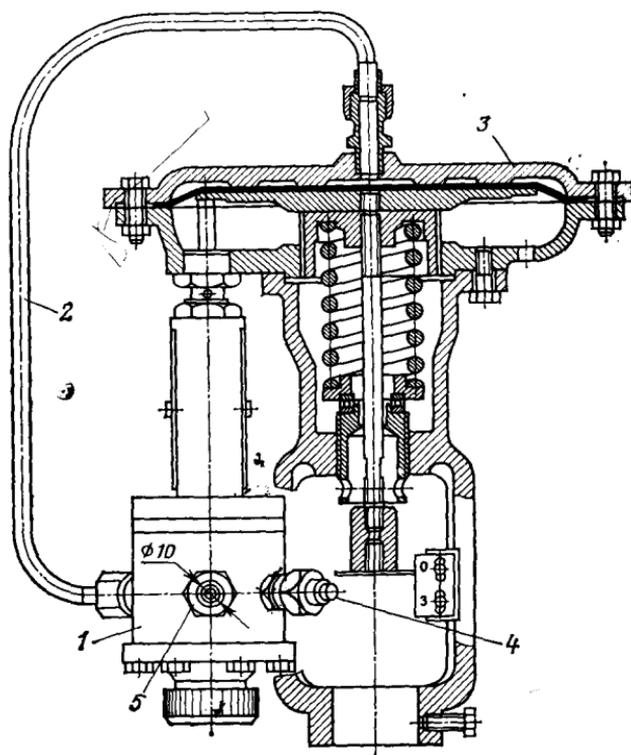
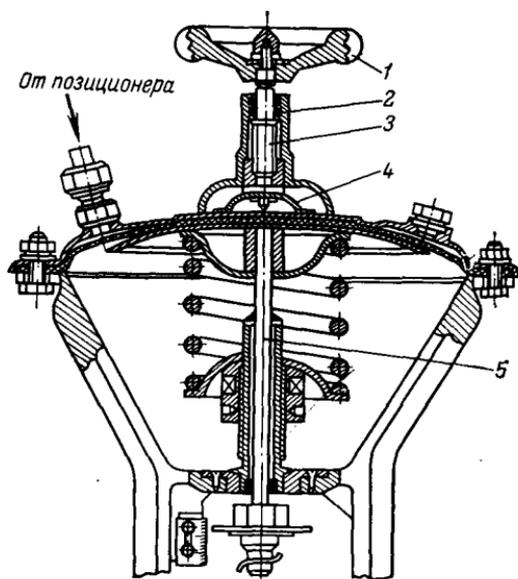


Рис. 11.15. Схема исполнительного механизма с позиционером:

1 — позиционер; *2* — импульсная линия; *3* — исполнительный механизм; *4* — подвод командного давления воздуха; *5* — подвод управляющего давления воздуха

Рис. 11.16. Исполнительный механизм с центральным дублером



меру A на линии питания увеличивается, а выход воздуха в атмосферу уменьшается.

С возрастанием давления в камере A нарушается равновесное состояние исполнительного механизма, что приводит к прогибу его мембраны. Опирающийся на мембрану механизма шток $б$ позиционера перемещается вверх и сжимает пружину 5 . Когда

противодействие пружины уравнивает силу, созданную возросшим давлением в камере B , перемещение мембранного блока, клапана 4 и изменение давления в камере A прекращаются.

При уменьшении сигнала, поступающего от регулятора, позиционер действует в обратном направлении. Давление воздуха в линии питания равно $0,25$ МПа, полный ход штока $б$ равен 6 мм.

На рис. 11.15 показана схема мембранного исполнительного механизма с позиционером.

Дублеры предназначены для ручного перемещения штока исполнительного механизма в случае аварийного прекращения подачи воздуха от регулятора, а также тогда, когда необходимо ограничить перемещение штока. Имеются дублеры двух видов: центральный и боковой.

Мембранный исполнительный механизм с установленным на нем центральным ручным дублером показан на рис. 11.16. Дублер состоит из маховика 1 , соединенного с ходовым винтом 2 , перемещающимся в корпусе 3 . При вращении маховика винт перемещает жесткий центр мембраны и соединенный с ним шток 5 механизма.

Поршневые исполнительные механизмы применяют в тех случаях, когда требуются большой ход и большие усилия.

На рис. 11.17 приведена схема поршневого исполнительного механизма ПСП-1. Пневматический сигнал от регулятора подводится в камеру A и давит на мембрану 2 , создавая усилие, направленное влево. К жесткому центру этой мембраны прикреплен шток $б$, левый конец которого управляет положением золотника 1 , а правый соединен с пружиной 5 жесткой обрат-

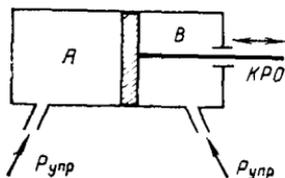
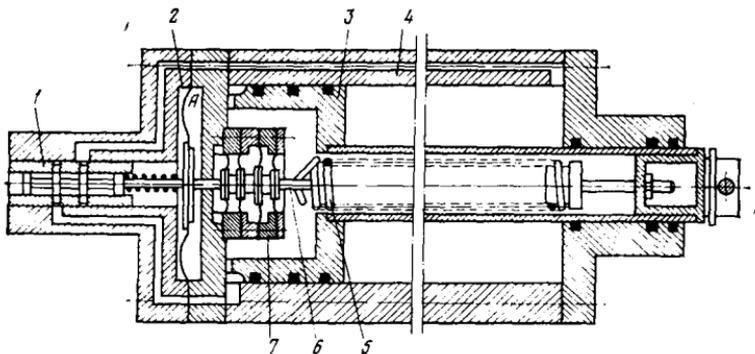


Рис. 11.17. Поршневой исполнительный механизм

ной связью. При движении золотник 1 соединяет рабочие полости цилиндра 4 по обеим сторонам поршня 3 либо с атмосферой, либо с линией питания воздухом, давление в которой составляет 0,3—0,6 МПа. При этом поршень 3 перемещается до тех пор, пока в результате изменения силы натяжения пружины не восстановится равновесие сил, действующих на поршень. Поршень 3 соединен со штоком исполнительного механизма. Таким образом, каждому значению входного давления соответствуют вполне определенные положения поршня и штока исполнительного механизма. Для отделения рабочей полости цилиндра от камеры А установлен мембранный пакет 7.

Регулирующие органы. Наибольшее применение в качестве регулирующих органов получили клапаны, представляющие собой регулируемые сопротивления. Принципиальная схема простейшего клапана приведена на рис. 11.18. Корпус 1 разделен перегородкой на две части. Поток протекающего вещества проходит через седло 2; в перегородке над седлом расположен затвор 3, прикрепленный к штоку 4, выведенному из корпуса

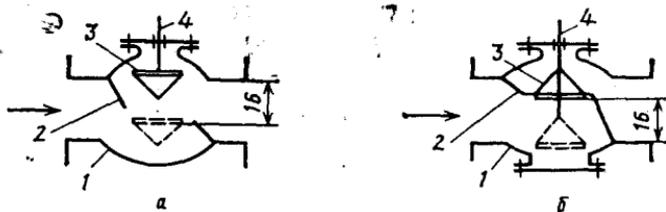


Рис. 11.18. Принципиальные схемы клапанов: а — односедельного; б — двухседельного

клапана через сальниковое уплотнение. Клапан может быть нормально (рис. 11.18, а) открытым и нормально закрытым (рис. 11.18, б). Проходное сечение клапана зависит от расстояния между седлом 2 и затвором 3.

Для регулирования больших расходов применяют *двухседельные клапаны*, основное преимущество которых в том, что затвор клапана разгружен. Усилие, развиваемое регулируемой средой, действует одновременно, но в противоположных направлениях на оба жестко связанных плунжера затвора клапана, что обусловлено перепадом давлений на клапане.

По условному давлению выпускаемые одно- и двухседельные клапаны подразделяются на три модификации: для низких давлений (до 1,6 МПа), средних (от 2,5 до 16 МПа) и высоких (от 20 до 150 МПа).

Регулирующие *трехходовые клапаны* предназначены для автоматического регулирования и поддержания в установленных пределах заданного параметра среды в отводящем патрубке, что достигается смещением сред, поступающих к клапану по подводящим патрубкам (рис. 11.19).

Принцип действия клапанов основан на изменении соотношения количества жидкости, поступающей через подводящие патрубки клапана.

Клапан состоит из регулирующего органа 16 и пневматического мембранно-пружинного исполнительного механизма 11. Основной частью регулирующего органа 16 является корпус 2, в котором имеются два патрубка. Снизу к корпусу крепится третий патрубок 1. Сверху корпус 2 закрыт крышкой 5, которая крепится на болтах 14. В корпус 2 и патрубок 1 вмонтированы седла 3 и 4. К внутренним уплотняющим фаскам седел пригнан легко перемещающийся в них плунжер (затвор) 17, который имеет форму полого цилиндра с двумя рядами прямоугольных

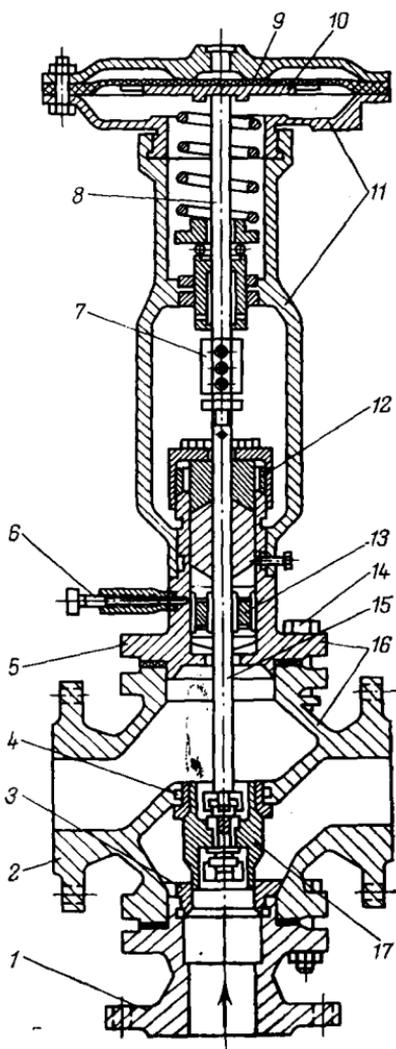


Рис. 11.19. Трехходовой клапан с мембранным исполнительным механизмом

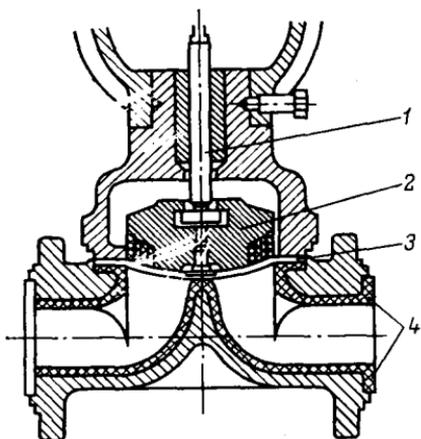


Рис. 11.20. Диафрагмовый клапан

окон, расположенных по его окружности. На средней части плунжера имеется выступающий пояс с уплотняющими фасками. К донышку плунжера крепится шток 15, уплотненный в верхней крышке 5 сальником 13. Для подтяжки сальника служит устройство 12, а для смазки — масленка 6.

Мембранно-пружинный исполнительный механизм крепится на верхней крышке 5 клапана болтами 14. Шток клапана 15 связан со штоком 8 исполнительного механизма 11 гайкой 7. Мембрана 9, грибок 10 и шток 8 исполнительного механизма, шток 15 и плунжер 17 регулирующего органа составляют подвижную систему. Для крепления на трубопроводе клапан имеет фланцы.

В отсутствие давления командного воздуха плунжер клапана пружиной исполнительного механизма устанавливается в крайнее верхнее положение. При этом проход среды, поступающей во входной горизонтальный патрубок, прекращается, а проходное сечение клапана для среды, поступающей в вертикально расположенный входной патрубок, открывается полностью. При подаче командного сигнала подвижная система клапана начинает перемещаться. При этом проходное сечение, через которое поступает среда из нижнего патрубка, начинает уменьшаться, а проходное сечение, через которое поступает среда из горизонтального патрубка, увеличивается.

Площадь проходных сечений плунжера 17 подобрана таким образом, что расход среды через выходной патрубок, при условии сохранения исходных параметров на входах и выходе клапана, остается неизменным, а характеристика смешивания — линейной. При снижении давления в мембранной камере исполнительного механизма подвижная система клапана начинает перемещаться вверх под действием пружины исполнительного механизма.

Клапаны для каждого условного прохода выпускаются в четырех исполнениях с плунжерами, имеющими равновеликие окна (исполнение I, II и III) с различными коэффициентами расхода и неравновеликие окна (исполнение IV). В клапанах, имеющих плунжеры с равновеликими окнами, для сохранения постоянства расхода через них при любом положении плунжера давление в двух подводящих трубопроводах должно быть одинаковым.

Диафрагмовые регулирующие клапаны применяют для изменения потока агрессивных жидкостей (рис. 11.20). Между корпусами исполнительного механизма и регулирующего орга-

на зажата кислотостойкая мембрана 3. На нижнем конце штока 1 исполнительного механизма укреплен плунжер грибовидной формы. При перемещении штока 1 вниз плунжер 2 прогибает мембрану 3, уменьшая проходное сечение клапана. Внутренняя поверхность 4 корпуса клапана футерована кислотостойкой эмалью или другими материалами.

Клапаны шланговые регулирующие типа КРШ являются исполнительными устройствами средних расходов. Они предназначены для автоматического регулирования жидких сред, содержащих твердые частицы во взвешенном состоянии, и кислот, в которых стойки резиновые патрубki.

Шланговый регулирующий орган (рис. 11.21) представляет собой резиновый корпус — патрубок 1, пережимаемый двумя валиками-траверсами. Патрубок помещен в герметичный кожух. Последний образован чугуном корпусом 2 и крышкой 3, соединение между которыми уплотнено прокладкой 4. На случай разрыва патрубка в крышке 3 предусмотрено сальниковое уплотнение штока 5. Сам патрубок 1 в корпусе 2 кожуха зажимается уплотнительными конусами-фланцами 6.

Верхняя траверса 7 жестко соединена со штоком 5. Нижняя траверса 8 прикреплена к верхней при помощи ролико-втулочной цепи. При перемещении штока 5 с прикрепленной к нему траверсой 7 вниз нижняя траверса 8 поднимается, и таким образом осуществляется пережим патрубка.

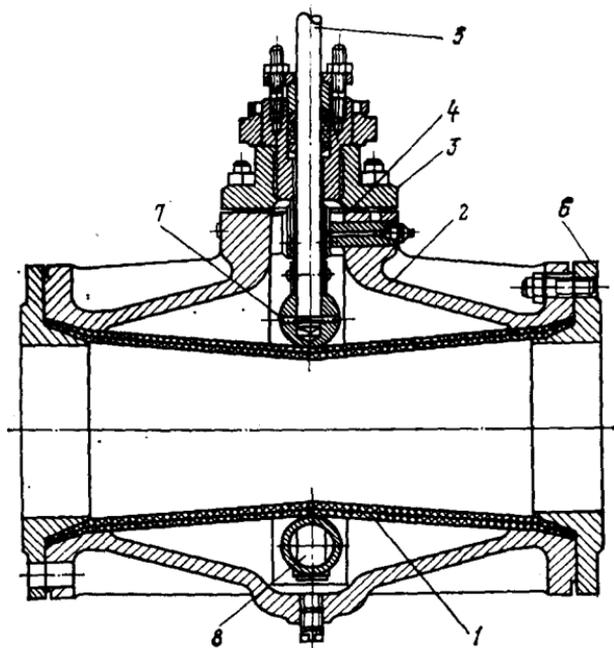


Рис. 11.21. Шланговый регулирующий орган

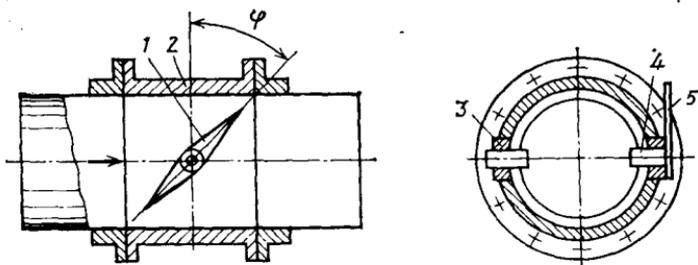


Рис. 11.22. Заслонка

Расход среды через шланговый клапан изменяется в основном только в первой половине подъема штока, зависимость между увеличением расхода и подъемом штока примерно линейная.

Коэффициент гидравлического сопротивления двухседельного регулирующего клапана с условным проходом 100 мм примерно 4—6, для шлангового патрубка с таким же условным проходом он равен 0,3—0,4.

Так как в шланговых регулирующих клапанах среда не контактирует с подвижными частями, чугуном корпусом и крышкой, клапаны можно применять для агрессивных продуктов, в которых стойки патрубки из резины соответствующих марок.

Для изменения потоков газа и пара в трубопроводах большого диаметра в качестве регулирующих органов применяют заслонки. Регулирующие заслонки типа ТА предназначены для сред с температурой до 200 °С, типа ТБ — для сред с температурой 200—400 °С.

Принцип действия регулирующих заслонок основан на изменении их пропускной способности при повороте диска (затвора), происходящем в соответствии с сигналом, поступающим от регулятора или устройства дистанционного управления.

Регулирующий орган в заслонках (рис. 11.22) ТА и ТБ представляет собой кольцевой корпус 2, внутри которого вращается диск 1, зафиксированный на полуосях 3 и 4. Полуось 4 выведена из корпуса 2 наружу через сальниковое уплотнение. На наружном конце этой полуоси укреплены стрелка для контроля положения диска и кривошип 5, предназначенный для соединения диска с исполнительным механизмом. Положение диска относительно плоскости, перпендикулярной потоку, определяет величину проходного сечения. Если принять за нуль положение диска, перпендикулярное к оси трубопровода, то при угле поворота $\varphi = 90^\circ$ заслонка полностью открыта. При $\varphi = 0$ проходное сечение минимально, но не равно нулю, так как затвор не обеспечивает полного закрытия поперечного сечения трубопровода; всегда остается небольшой кольцевой зазор.

При выборе исполнительных устройств по пропускной способности определяют следующие параметры этих устройств:

условную пропускную способность, диаметр условного прохода, вид пропускной характеристики (для плунжерных клапанов), рабочее давление и диапазон перепада давления на клапане или заслонке.

Условной пропускной способностью K_{vy} называется номинальный расход ($m^3/ч$) жидкости плотностью $1000 \text{ кг}/m^3$, протекающей через полностью открытый регулирующий орган при перепаде давления на нем $0,1 \text{ МПа}$. Действительная максимальная пропускная способность, достигаемая при 100% -ном перемещении плунжера K_{v100} , может отличаться от условной на $\pm 10\%$. Условная пропускная способность K_{vy} зависит от диаметра условного прохода регулирующего органа D_y и коэффициента α , зависящего от вида регулирующего органа:

$$K_{vy} = \alpha D_y^2. \quad (11.6)$$

Коэффициент α имеет следующие значения:

Трехходовые односедельные и диафрагмовые клапаны	0,012
Двухседельные клапаны	0,016
Шланговые клапаны	0,05
Заслонки	0,02

Условные проходы регулирующих клапанов, т. е. размеры присоединительных патрубков, выбирают из стандартного ряда, приведенного в табл. 11.1.

Таблица 11.1. Условная пропускная способность регулирующих органов

Диаметр условного прохода D_y , мм	Дисковые	Двухседельные	Односедельные	Трехходовые*	Шланговые	Диафрагмовые
15	—	4	3,2	3,2/2,5	12	3
20	—	6,3	5	5/4	20	5
25	—	10	8	8/6,3	32	8
32	—	16	12	12/10	50	12
40	—	25	20	20/16	80	20
50	50	40	32	32/25	125	32
65	80	63	50	50/40	200	50
80	125	100	80	80/63	320	80
125	320	250	200	200/160	800	200
150	500	400	320	320/250	1250	320
200	800	630	500	500/400	2000	—
250	1250	1000	—	—	3200	—
300	2000	1600	—	—	5000	—
400	3200	2500	—	—	—	—
500	5000	4000	—	—	—	—
600	8000	—	—	—	—	—
700	10000	—	—	—	—	—
800	12500	—	—	—	—	—
900	16000	—	—	—	—	—
1000	20000	—	—	—	—	—

* Смесительные/разделительные.

Пропускной характеристикой регулирующего органа называют взаимосвязь между расходом вещества через клапан (за-слонку) и положением затвора (плунжера), т. е.

$$K_V = f(S),$$

где S — ход затвора.

Наиболее распространенными являются линейная и равно-процентная расходные характеристики. *Линейной* называется пропускная характеристика, при которой приращение пропуск-ной способности пропорционально перемещению затвора, а *равнопроцентной* — та, при которой приращение пропускной способности по ходу пропорционально текущему значению про-пускной способности.

Односедельные, двухседельные и трехходовые клапаны обычно имеют линейную или равнопроцентную пропускную ха-рактеристику. В других регулирующих органах она подчиняется более сложным закономерностям.

Рабочее давление P_p , т. е. допустимое давление при задан-ной рабочей температуре, устанавливают по условному допу-стимому давлению P_y . Поскольку с повышением температуры прочность материала клапана снижается; для исполнительных устройств рабочие давления меньше условных. Их определяют по уравнению

$$P_p = P_y (\sigma_d^t / \sigma_d^{20}), \quad (11.7)$$

где σ_d^t — допустимое напряжение материала при рабочей температуре; σ_d — допустимое напряжение материала при 20 °С.

Перепад давления ΔP на регулировочном органе определя-ет усилия, на которые рассчитаны все подвижные детали испол-нительного устройства, а также износ дроссельных поверхно-стей.

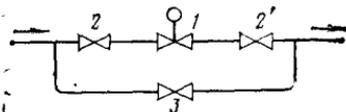
С методикой выбора и расчета исполнительных устройств можно ознакомиться в специальной литературе*.

Клапаны должны применяться строго по назначению в соот-ветствии с их рабочими параметрами. Монтаж регулирующего клапана следует производить на прямом участке трубопровода. Длина прямого участка трубопровода до и после клапана долж-на быть не менее шести его условных проходов. Клапаны должны устанавливаться в местах, допустимых для обслужива-ния, осмотра, настройки и разборки. Нормальное установочное положение клапана на горизонтальном трубопроводе — верти-кальное с мембранной головкой вверх. Регулирующий клапан следует располагать на трубопроводе так, чтобы направление потоков среды соответствовало указанию стрелки на его кор-пусе.

* В. Г. Патрикеев, Ю. С. Сербулов. Специальные исполнительные устройства в химической промышленности. Воронеж, 1982. 250 с.

Рис. 11.23. Схема размещения регулирующего органа на трубопроводе:

1 — клапан; 2, 2' — запорные задвижки; 3 — вентиль



Для устранения неисправностей в работе клапана следует предусмотреть обводную линию с запорными задвижками (рис. 11.23).

11.4. ВСПОМОГАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

К вспомогательному оборудованию относятся фильтры воздуха, редукторы давления и устройства дистанционного управления.

Фильтры воздуха. Фильтры типа ФВ предназначены для окончательной очистки от масла, влаги и механических примесей воздуха, поступающего на питание пневматических приборов.

Фильтры выпускают в двух модификациях: индивидуальные типа ФВ-6 и групповые типа ФВ-25. Конструкция фильтра приведена на рис. 11.24.

Фильтр состоит из двух ступеней фильтрации: предварительной фильтрации воздуха от масла и посторонних механических частиц и окончательной — отделение мельчайших частиц аэрозолей. Предварительная фильтрация воздуха от масла и

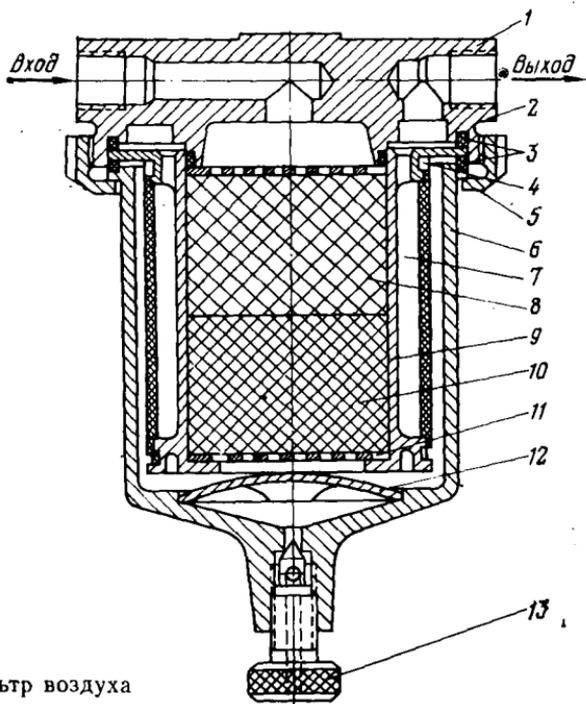
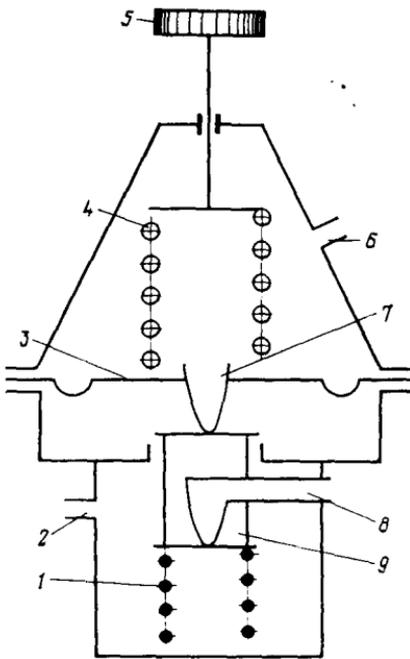


Рис. 11.24. Фильтр воздуха

Рис. 11.25. Редуктор воздуха



посторонних механических частиц осуществляется при прохождении воздуха через два слоя стекловолкна — грубого 8 и более тонкого 10. Окончательная фильтрация происходит при прохождении предварительно очищенного воздуха через фильтрующую ткань 7 типа ФП11-15, обладающую хорошими фильтрующими свойствами, что обеспечивает эффективность фильтрации воздуха не ниже 99,95%. Конденсат и механические примеси скапливаются в отстойнике под пружинным отражателем 12, который предотвращает захват конденсата проходящим потоком очищаемого воздуха.

Все фильтрующие элементы двух ступеней фильтрации заключены в специальный фильтрующий стакан 9, содержащий сетки 11. Стакан на половину внутреннего объема заполнен тонким стекловолкном. Стекловолкно поджимается сетками. Снаружи стакан 9 обматывают тремя слоями фильтрующей ткани типа ФП11-16, уплотняя ее по краям проволокой 4. Фильтрующий стакан помещен в корпус 6, через прокладки 2 и 3 накидной гайкой 5 он поджимается к основанию фильтра 1. Отвернув гайку 5 и отделив корпус, фильтрующий стакан при необходимости можно легко извлечь и заменить новым. Слив конденсата осуществляется через отверстие с винтом 13.

Редукторы давления. Редуктор типа РВ-5022 (рис. 11.25) предназначен для поддержания постоянного давления воздуха, подаваемого на пневматические приборы.

Принцип действия редуктора основан на уравнивании противоположно направленных сил упругой деформации пружины и давления сжатого воздуха в подмембранной полости. Заданное давление устанавливается вращением регулировочного винта 5, увеличивая или ослабляя усилие пружины 4. Воздух через входное отверстие 8 клапана 9 поступает в соединенную с выходным штуцером 2 полость под мембраной 3. При увеличении давления на выходе выше заданного мембрана 3 несколько приподнимается, сбрасывая излишки воздуха через сопло 7 и отверстие 6 в атмосферу, а клапан 9, перемещаясь под давлением пружины 1, уменьшает поступление воздуха до заданного.

При изменении давления на выходе ниже заданного под дей-

ствием пружины 4 мембрана 3, прогибаясь, соплом 7 открывает клапан 9, увеличивая поступление воздуха до заданного.

Дистанционная панель управления. Предназначена для дистанционного ручного управления исполнительным механизмом, автоматического регулирования с программным заданием, а также для плавного перехода с ручного регулирования и наоборот.

Пневматическая схема панели управления реализована на базе элементов УСЭППА и двухстрелочного манометра типа МТ2П-7.

Воздух питания через штуцер IV (рис. 11.26) поступает на задатчики 1 и 3, пневмокнопки 4, 10, 11 и на пневматический делитель 7, собранный на двух дросселях П-1127. Делитель создает давление подпора, равное $0,5 P_{пит}$ в камерах *b* и *c* реле (типа ПР.1) 5 и 8 и в камере *c* клапана (типа ПУЗК1) 9. Переключатель 6 служит для присоединения к устройству программного задатчика при автоматическом регулировании с программным заданием.

Работа панели в различных режимах, а также переход с одного вида регулирования на другой осуществляется следующим образом. При ручном управлении нажатием кнопки *Р11* пере-

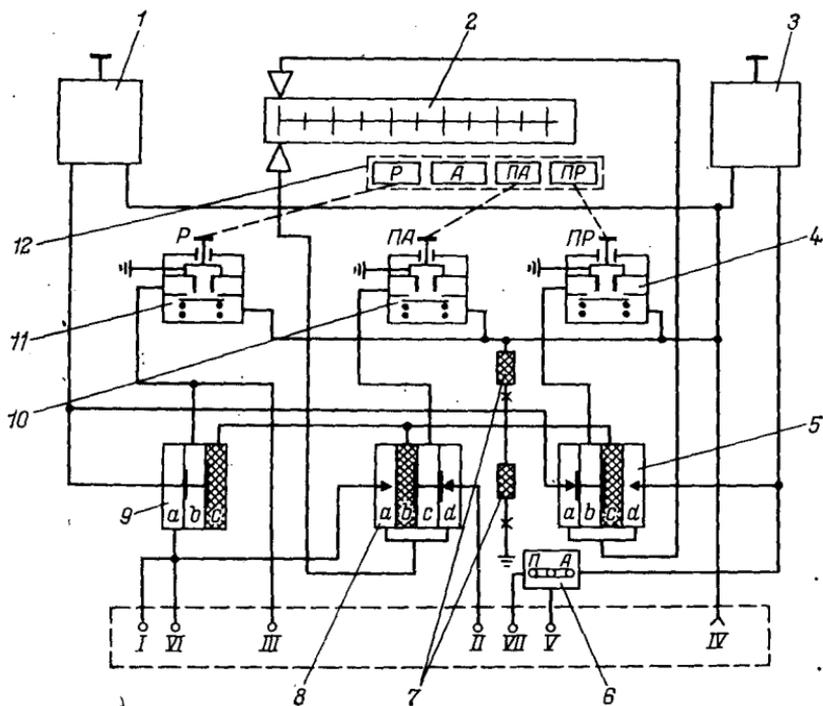


Рис. 11.26. Принципиальная схема панели дистанционного управления:
 I — выход регулятора; II — регулируемый параметр; III — выключающее реле регулятора;
 IV — питание; V — задание; VI — исполнительный механизм; VII — программа

ключателя 12 подается командное давление в камеру *b* нормально закрытого клапана 9 и в линию III выключающего реле. Пневмоконтакт клапана открывается, и на его выход и далее в линию VI исполнительного механизма поступает управляющий сигнал задатчика 1. Этот же сигнал через канал в плате и открытый пневмоконтакт камеры *a* реле 8 поступает на манометр 2, где контролируется по нижней стрелке; по верхней стрелке контролируется выходное давление задатчика 3.

Для плавного перехода с ручного управления на автоматическое регулирование в приборе предусмотрен контроль регулируемого параметра. В этом случае необходимо нажать кнопку ПА10 переключателя 12. Вращением ручки управления задатчика 3 величину выходного давления устанавливают равной величине регулируемого параметра (верхняя и нижняя стрелки манометра 2 совмещаются). В данном случае выходное давление задатчика 3 через переключатель 6 поступает в линию V задания регулятора.

Выход I регулятора постоянно связан с линией VI исполнительного механизма. Наличие этой связи и возможность установки задания, равного по величине регулируемому параметру, позволяют сформировать на выходе регулятора сигнал, равный управляющему сигналу задатчика 1, и осуществить плавный переход с ручного управления на автоматическое регулирование. При этом выполняется следующая последовательность действий: включается кнопка ПА переключателя 12; вращением ручки управления задатчика 3 верхняя стрелка манометра 2 совмещается с нижней; кнопка ПА выключается; включается кнопка А переключателя 12.

Переход с ручного управления на автоматическое программное регулирование осуществляется следующим образом. Верхняя плата переключателя 6 устанавливается так, чтобы буква П находилась в верхнем положении. К линии П подключается выход программного задатчика. В момент, когда величина программного задания, контролируемая по вторичному прибору или по шкале задатчика, станет равной значению параметра, нажимается кнопка А.

При автоматическом регулировании с постоянным заданием включена кнопка А переключателя 12, а кнопка Р выключена. Задание регулятору устанавливается задатчиком 3, выход которого через переключатель 6 связан с линией V задания регулятора и через открытый пневмоконтакт камеры *d* реле 5 связано с манометром 2. Величину задания контролируют по верхней стрелке манометра.

Для перехода с автоматического регулирования на ручное управление необходимо, чтобы величина управляющего сигнала задатчика 1 была равна величине выходного давления регулятора. При этом выполняется следующая последовательность действий: включается кнопка ПР переключателя 12; вращением ручки управления задатчика 1 верхняя стрелка манометра 2

совмещается с нижней; кнопка *ПР* выключается; включается кнопка *Р* переключателя *12*.

При программном регулировании необходимо линию *VII* выхода программного задатчика соединить с линией *V* задания регулятора. Это осуществляется поворотом верхней платы переключателя *6*. Процесс проходит при нажатой кнопке *4* переключателя *12*.

11.5. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ РЕГУЛЯТОРЫ

Комплекс электрических средств регулирования позволяет решать следующие задачи автоматического управления:

функциональное преобразование сигналов (дифференцирование, интегрирование, суммирование, умножение, деление, возведение в квадрат, извлечение квадратного корня, формирование произвольной нелинейности, ограничения, выделение экстремального сигнала, нормирование электрических сигналов, сигнализация, логические операции);

формирование регулирующего воздействия (регулирование по *П*, *ПД*-, *ПИ*- и *ПИД*-законам, программное регулирование по времени и по параметру, регулирование соотношения параметров, каскадное регулирование, позиционное регулирование, регулирование с изменением структуры системы, по заданному алгоритму, регулирование с адаптацией);

дискретная коррекция динамических настроек регулятора в функциональной зависимости от параметров;

установка задания регулятору (ручного или программного);

коррекция задания регулятору по команде от управляющей вычислительной машины;

дистанционное управление исполнительными механизмами.

Перечисленные задачи решаются также в системе *КАСКАД* и *КАСКАД-2*.

Ниже рассмотрены структурные схемы электрических регуляторов.

Позиционный регулятор. *Пз* — регулятор типа *ТЭ* предназначен для регулирования температуры в системах технологического конденсирования воздуха во взрывоопасных помещениях. Приборы выпускаются двух типов: *ТЭ1Пз* — двухпозиционные и *ТЭ2Пз* — трехпозиционные со встроенным импульсным прерывателем.

Работа приборов основана на принципе уравновешенного моста. Принципиальная схема регулятора показана на рис. 11.27.

Датчик *1* включен в плечо измерительного моста *2* с задатчиком *3*. Выход измерительного моста подключен к усилителю постоянного тока *4* с отрицательной обратной связью в плече измерительного моста. К выходу усилителя постоянного тока через импульсный прерыватель *5* подключен трехпозиционный

блок управления 6, имеющий выходные команды «Меньше» и «Больше».

Конструктивно приборы выполнены с использованием унифицированных типовых конструкций (УТК) ГОСТ 20504—75.

Ферродинамический регулятор ПИ-действия. Регулятор ферродинамический пропорционально-интегральный типа РФ-ПИ предназначен для формирования регулирующего воздействия в виде сигнала переменного тока. Может применяться в качестве: регулятора-стабилизатора любой физической величины; регулятора-стабилизатора соотношения двух параметров или двух групп параметров; корректирующего регулятора к регуляторам, работающим от сигнала ферродинамического преобразователя.

Задающими устройствами могут быть задатчики дистанционные ферродинамические типов ДЗП и 2ДЗП и другие приборы, имеющие выходной ферродинамический преобразователь ПФ или дифференциально-трансформаторный преобразователь ПД.

Сигнал ошибки (алгебраическая сумма сигналов, снимаемых с ферродинамических преобразователей параметра и задатчика), поступает на линейный усилитель с тремя выходными обмотками.

Обмотка *a* (рис. 11.28) нагружена на делитель напряжения ДН. Сигнал обмотки *b* поступает на фазочувствительный каскад 3, нагрузкой которого является управляющая обмотка двигателя. Кроме того, фазочувствительный каскад 3 выполняет одновременно функции схемы И и имеет второй вход, подключенный к выходу широтно-импульсного модулятора 4, запускаемого от пересчетного устройства и преобразующего выпрямленное напряжение обмотки в прямоугольные импульсы неизменной амплитуды, длительность которых пропорциональна сигналу ошибки.

Таким образом, двигатель 2 работает в импульсном режиме, включается периодически с частотой f , задаваемой делителем

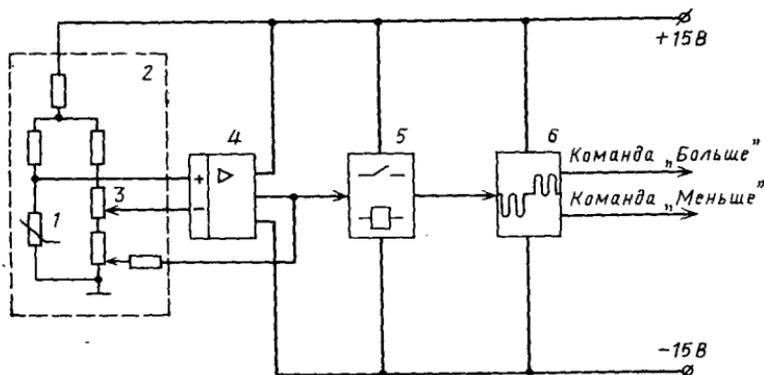
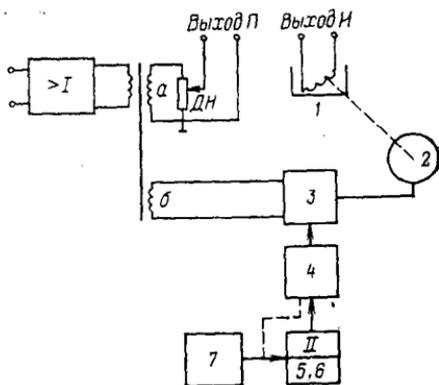


Рис. 11.27. Структурная схема трехпозиционного регулятора

Рис. 11.28. Блок-схема регулятора типа РФ-ПН

частоты генератора, на время, равное длительности импульса t_n . Средняя скорость вращения вала двигателя пропорциональна сигналу ошибки. Выходной вал двигателя кинематически связан с рамкой ферродинамического преобразователя 1. Следовательно, скорость изменения сигнала ферродинамического преобразователя 1 прямо пропорциональна сигналу ошибки ΔE . Так, если сигнал ошибки, усиленный усилителем напряжения, суммируется с сигналом ферродинамического преобразователя, то выходной сигнал регулятора изменяется по следующему закону:



$$E_p = K_p \Delta E + K v_{\max} \int \Sigma \Delta E \approx K_1 \int \Delta E dt, \quad (11.8)$$

где K_p — коэффициент усиления регулятора; v_{\max} — максимальная скорость вращения вала двигателя; K_1 — коэффициент ($K_1 = K \cdot v_{\max} f$), определяющий время интегрирования, зависит от частоты f и задается ее изменением.

Уравнение (11.8) показывает, что настройки регулятора взаимонезависимы.

Блок-схема регулятора (см. рис. 11.28) содержит линейный усилитель с трансформаторным выходом 1, делитель напряжения ДН, предназначенный для задания коэффициента усиления пропорциональной части регулятора K_p и электромеханический интегратор с блоком задания времени интегрирования.

Электромеханический интегратор состоит из конденсаторного асинхронного двигателя 2, связанного кинетически с рамкой ферродинамического преобразователя 1, и схемы управления двигателем: фазочувствительного каскада 3 и широтно-импульсного модулятора 4. Блок задания времени интегрирования имеет входной формирователь 5, предназначенный для формирования из напряжения частоты генератора 7 импульсов той же частоты с фиксированной вольтсекундной площадью, и пересчетное устройство 6.

Для решения сложных задач в системах автоматического управления и регулирования используются системы и комплексы средств. В частности, разработан комплекс агрегатных средств контроля и регулирования (АКЭСР). В этот комплекс входят установки многоканальные регулирующие типов А306-14 и А305-13. Они предназначены для регулирования по пропорциональному (П) или пропорционально-интегральному (ПИ) законам технологических параметров или объектов в различных областях промышленности.

Установки выполняют следующие функции:

осуществляют регулирование по П- и ПИ-законам последовательно в каждом из каналов с отдельной по каждому каналу установкой параметров динамической настройки;

осуществляют вызывной контроль истинной величины параметра, а также выходной регулируемой величины или угла поворота регулирующего органа, сигнализируют об отклонении от нормы по каждому каналу и о цикличности работы каждого канала в автоматическом режиме работы;

осуществляют ручное управление исполнительными устройствами; .

позволяют производить безударный переход с ручного управления на автоматическое и сигнализировать о ручном режиме работы канала.

Формирование законов регулирования в установке типа А305-13 происходит при охвате корректирующей обратной связью определенного канала высокоомного усилителя, формирующего регулирующей разбаланс, и модуля памяти того же канала, который запоминает усиленное рассогласование рассматриваемого канала на период обегания.

Установки содержат блок задающих величин, блок измерений и преобразований, блок обегających устройств, блок разделения во времени процессов измерения и регулирования, регулирующее устройство, корректирующее устройство, накопитель аналоговых величин, исполнительные устройства. Сигналы с датчиков технологических параметров поступают в блок измерений и преобразований. Сигналы с этого блока, суммируясь с сигналами блока задающих величин и корректирующих устройств, через блок обегających устройств поступают на вход регулирующего устройства.

Время связи каждого датчика с исполнительным устройством разделяется при помощи блока разделения во времени на время измерения (когда происходит измерение параметра) и время регулирования (когда выходной сигнал с регулирующего устройства через блок обегających устройств поступает на соответствующий накопитель аналоговой величины, где происходит запоминание регулирующего воздействия). Сигналы с накопителей поступают на корректирующие устройства и одновременно на исполнительные устройства. Исполнительные устройства воздействуют на объект регулирования таким образом, что истинное значение параметра технологического процесса становится равным заданному.

Основой функциональных схем установок многоканальных регулирующих является общая структурная схема (рис. 11.29).

В качестве измерительно-преобразовательного блока используются модули коммутации сигналов низкого уровня в сочетании с модулями усилителя нормирующего и линеаризатора. Задание производится в цифровом виде, поэтому в качестве блока задающих величин применяют модули задания устано-

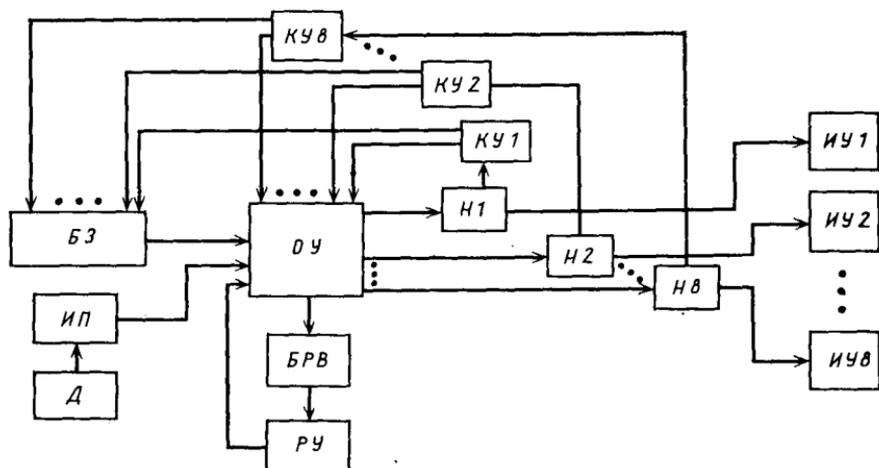


Рис. 11.29. Структурная схема установок типов А306-14 и А305-13:

БЗ — блок задающих величин; *ИП* — измерительно-преобразовательный блок; *Д* — датчики; *ОУ* — обтекающее устройство; *РУ* — регулирующее устройство; *БРВ* — блок разделения во времени; *Н1—Н8* — накопители аналоговых величин; *КУ1, КУ8* — корректирующие устройства; *ИУ1—ИУ8* — исполнительные устройства

вок типов М31—М38, которые позволяют задавать параметры от 0 до 100% независимо по каждому каналу.

Для преобразования цифрового кода, который получается на выходе модулей задания установок, используют блок цифро-аналогового преобразователя (ЦАП). В этом блоке код преобразуется в унифицированный аналоговый сигнал напряжением 0—10 В. Такой же сигнал имеется и на выходе линейризатора. Сравнение и выработка разбаланса происходят в блоке многоточечного регулирования типа БА.35.001.

Обтекающее устройство, выполненное на средствах АКЭСР, не представляет собой единого конструктивно и функционально законченного блока, а состоит из блока центрального управления (БЦУ) и ряда коммутаторов и распределителей, выполненных в виде однотипных плат модулей коммутации контактных (МКК), конструктивно и функционально относящихся к блокам, в которых расположены переключаемые ими цепи. Поэтому на функциональной схеме в блоке многоточечного регулирования (БМР) имеются МКК для переключения корректирующих устройств и распределителя — для распределения сигнала с выхода БМР на модули аналоговой памяти (МАП), которые использованы как накопители аналоговой величины.

Блок разделения во времени процессов измерения и регулирования выполнен в виде модуля МРВ в блоке центрального управления. Кроме основного тракта регулирования, отражающего содержание общей структурной схемы, на функциональной схеме имеется тракт сигнализации, в который входит типовой из АКЭСР усилитель сигнализации (УС), модули сигнализации с памятью, расположенные в объеме БЦУ, и сигнальные

лампочки на плате сигнализации (ПС) в станции управления. Тракт сигнализации позволяет осуществлять сигнализацию при отклонении параметра от нормы. Кроме того, в каждой из установок имеются тракт контроля и тракт ручного управления.

Переключение законов регулирования и установка параметров настройки (K_p) и (T_i) производится на лицевых панелях модулей корректирующих устройств блока многоточечного регулирования. В процессе регулирования контролируются две величины: истинное значение параметра и значение выходной регулирующей величины или положение регулирующего органа.

Исполнительные механизмы электрических регуляторов. По принципу действия электрические исполнительные механизмы подразделяются на электромагнитные (соленоидные) и электродвигательные. *Электромагнитные исполнительные механизмы* представляют собой электромагниты большой мощности, преобразующие электрический сигнал в перемещение регулирующего органа. Так как соленоидные исполнительные механизмы характеризуются релейностью действия, их обычно применяют в схемах двухпозиционного регулирования с регулирующими органами небольших размеров.

Для работы с другими регуляторами (например, системы АКЭСР) применяют электродвигательные исполнительные механизмы.

В электродвигательных исполнительных механизмах используют как управляемые, так и неуправляемые двигатели. В исполнительных механизмах с неуправляемым двигателем в качестве управляющего элемента служит муфта, которая в зависимости от поступающего на нее сигнала частично или полностью передает крутящий момент, создаваемый непрерывно работающим двигателем, на выходной вал.

Исполнительные механизмы с управляемым двигателем подразделяются на контактные и бесконтактные. Для управления регулирующими органами в бесконтактных системах автоматического регулирования и дистанционного управления применяют исполнительные механизмы типа МЭО. Принцип действия механизма основан на преобразовании электрического сигнала при помощи малоинерционного асинхронного электродвигателя и редуктора во вращательное движение с постоянной скоростью. Управление механизмом может быть бесконтактное — при помощи магнитных усилителей УМД-160 и контактное — при помощи реверсивных контактных пусковых устройств (магнитных пускателей МКР-0-58).

Исполнительный механизм показан на рис. 11.30. Редуктор является основным узлом, на котором смонтированы все элементы механизма. Для привода механизмов применяют двухфазные реверсивные электродвигатели типа ДАУ, допускающие длительную работу в стопорном режиме. Переход на ручное

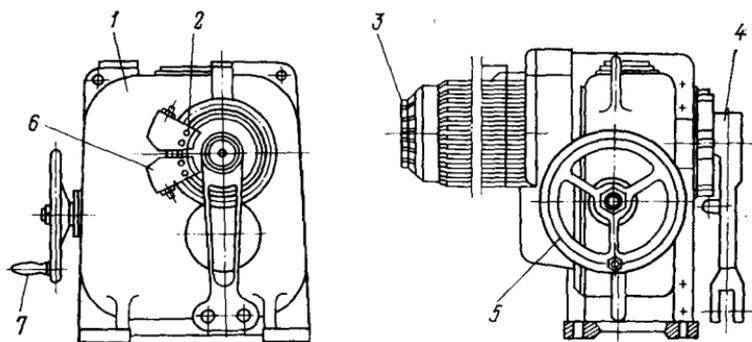


Рис. 11.30. Исполнительный механизм типа МЭО:

1 — редуктор; 2 — узлы упоров; 3 — электродвигатель; 4 — рычаг; 5 — штурцерный ввод; 6 — блок датчиков; 7 — ручной привод

управление механизмов осуществляется поворотом маховика ручного привода.

Электромагнитный тормоз предназначен для уменьшения выбега и фиксации выходного вала в любом положении после исчезновения управляющего сигнала.

Для обратной связи и дистанционного указания положения выходного вала в механизме применяют, например, блок датчика БДР, состоящий из двух реостатных датчиков с сопротивлением 120 Ом и четырех микропереключателей. Механизм соединен с узлом управления регулирующего органа соединительной тягой.

Исполнительный механизм может работать в режиме повторно-кратковременном реверсивном с ПВ-25% при номинальном моменте с числом включений до 300 в течение 1 ч.

11.6. ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ РЕГУЛЯТОРЫ

В автоматизированных системах управления технологическими процессами с мощными агрегатами и другим крупным оборудованием, где перемещение регулирующих органов по определённому закону требует больших усилий, применяют гидравлические регулирующие устройства. Элементарной базой для гидравлических регуляторов (ГСП) является система элементов гидравлической регулирующей автоматики (СЭГРА), представляющая собой комплекс прогрессивных унифицированных элементов-модулей, построенных по принципу силовой компенсации.

Регуляторы на базе элементов СЭГРА лишены основных недостатков, присущих гидравлическим регуляторам, в частности гидравлическим регуляторам со струйной трубкой и золотниковым, и обладают широкими схемными возможностями, большим диапазоном настроек, высокими динамическими характеристиками, простотой конструкции, надёжностью в эксплуатации.

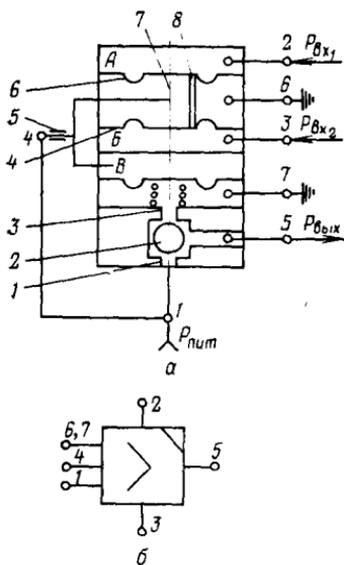


Рис. 11.31. Усилитель операционный гидравлический:

а — принципиальная схема; б — условное обозначение

СЭГРА построена по блочно-модульному принципу, как и УСЭППА. На базе СЭГРА могут быть построены регуляторы, формирующие интегральный (И), пропорциональный (П), пропорционально-интегральный (ПИ), пропорционально-дифференциальный (ПД) и пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) законы регулирования, а также сложные разветвленные аналоговые и релейные схемы. В основу построения системы положен принцип операционного (решающего) усилителя. В ком-

плект СЭГРА входят: усилитель операционный типа СУ-3, усилитель решающий типа УРГ-1, дроссель винтовой регулируемый типа ДВР, емкость гидравлическая типа Е-0,1, преобразователь усилия типа ПУ-2, стабилизатор давления типа СД-1; реле гидравлическое типа РГ-1 и другие изделия.

Усилитель операционный ОУ-3 предназначен для суммирования и усиления гидравлических сигналов, поступающих на его вход. На базе усилителя обеспечивается построение функциональных звеньев гидравлических регуляторов (сумматора, умножителя на постоянный коэффициент, интегратора, дифференциатора), а также гидравлических регуляторов, формирующих П-, И-, ПИ-, ПД- и ПИД-законы регулирования.

Принципиальная схема усилителя операционного гидравлического ОУ-3 и условное обозначение приведены на рис. 11.31. Усилитель состоит из двух узлов: элемента сравнения (сумматора) и усилителя мощности. Элемент сравнения представляет собой мембранный блок, состоящий из двух гофрированных резино-тканевых мембран 4 и 6 с эффективной площадью около 5 см², которые связаны с жестким центром 8. Входные гидравлические сигналы (давления жидкости) подаются в камеры А и В и усиливаются на элементе жидкости типа сопло — заслонка 7 и постоянном дросселе 5.

При перемещении мембранного блока зазор между соплом и заслонкой изменяется, что приводит к изменению давления в междроссельной камере и соответственно в камере В усилителя мощности. Усилитель мощности представляет собой систему из двух сопл, напорного 1 и сливного 3, между которыми помещен шарик 2. Положение шарика зависит от величины давления в камере В, а давление на выходе — от положения

шарика. Усилитель реализует функциональную зависимость

$$P_{\text{вых}} = K_y P_{\text{вх}}, \quad (11.9)$$

где $P_{\text{вх}}$ — разность давлений в камерах A и B ; K_y — коэффициент усиления.

Дроссель винтовой регулируемый типа ДВР (рис. 11.32) является одним из элементов системы и предназначен для формирования функциональных звеньев на базе гидравлического операционного (решающего) усилителя. Дроссель обеспечивает линейную зависимость расхода рабочей жидкости от перепада давления

$$Q = \Delta P / R, \quad (11.10)$$

где ΔP — перепад давления; R — гидравлическое сопротивление.

ДВР состоит из корпуса 2, в котором при помощи винта 3 перемещается шток 1 с винтовой канавкой. Для изменения сопротивления плеч дросселя необходимо изменять длину винтовой канавки, заключенной между каналами выхода.

Емкость гидравлическая типа Е-0,1 является одним из элементов системы и предназначена для формирования на базе гидравлического операционного (решающего) усилителя функциональных звеньев.

На рис. 11.33 представлена принципиальная схема гидроемкости. Жидкость подводится к камерам A и B . Постоянный перепад давления на мембранном блоке соответствует нулевому расходу. При изменении давления мембранный блок перемещается, увеличивая объем одной камеры и уменьшая объем другой. При этом жидкость заполняет одну камеру и вытесняется из другой. Таким образом, емкость обеспечивает функциональную зависимость расхода рабочей жидкости от перепада давления

$$Q = C_r \frac{d(\Delta P)}{dt}, \quad (11.11)$$

где ΔP — перепад давления ($\Delta P = P_{\text{вх}1} - P_{\text{вх}2}$); C_r — постоянная емкости.

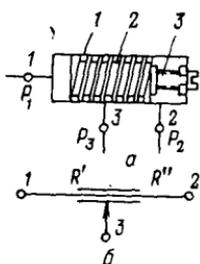


Рис. 11.32. Дроссель винтовой регулируемый:

a — принципиальная схема; b — условное обозначение

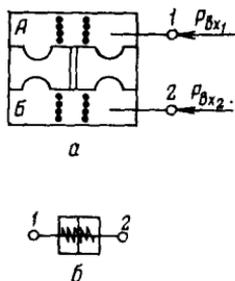


Рис. 11.33. Емкость гидравлическая типа Е-0,1:

a — принципиальная схема; b — условное обозначение

В системе СЭГРА применяют *исполнительные механизмы прямого хода*, реализующие зависимость

$$X_{\text{вых}} = K_{\text{п}} P_{\text{вх}}, \quad (11.12)$$

где $X_{\text{вых}}$ — положение штока или вала исполнительного механизма; $K_{\text{п}}$ — коэффициент пропорциональности; $P_{\text{вх}}$ — сигнал, поступающий на исполнительный механизм с выхода устройства выработки закона регулирования.

К исполнительным механизмам такого типа относятся подпружиненные мембранные исполнительные механизмы, позиционеры и т. д.

На рис. 11.34 представлена принципиальная схема позиционера, состоящая из цилиндра 1 с подпружиненным поршнем 2, усилителя мощности 3, в качестве которого используется усилитель типа УРГ-1, и датчика положения 4, в качестве которого применяют преобразователь усилия типа ПУ-2.

Входной сигнал от центральной части регулятора поступает в камеру А усилителя. Это приводит к изменению давления на выходе усилителя, что в свою очередь вызывает движение поршня исполнительного механизма и изменение поджатия пружины 5 преобразователя усилия, и давление на выходе преобразователя усилия изменяется. Система приходит в равновесие тогда, когда сигнал давления на выходе датчика обратной связи равен входному сигналу.

Со струйными и золотниковыми гидравлическими регуляторами используются также *кривошипные исполнительные механизмы*.

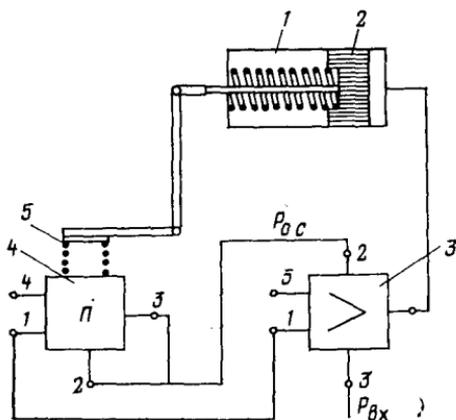
На рис. 11.35 представлена схема кривошипного гидравлического исполнительного механизма. В чугунном цилиндре 1 находится поршень 2. Шагуном 3 поршневой палец соединен с кривошипом 6. Последний насажен на вал 5, один конец которого через уплотнительный сальник выведен из корпуса наружу. На наружный конец вала насажен ведущий рычаг 7, сочленяемый при помощи тяги с регулирующим органом. Штуцер 8 служит для подвода масла от регулятора, а пробка 4 — для удаления воздуха из корпуса. Исполнительный механизм крепится на плите 9.

удаления воздуха из корпуса. Исполнительный механизм крепится на плите 9.

11.7. СХЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ И ВЫБОР РЕГУЛЯТОРОВ

Приборы и регуляторы системы Старт дают возможность составлять различные

Рис. 11.34. Принципиальная схема позиционера



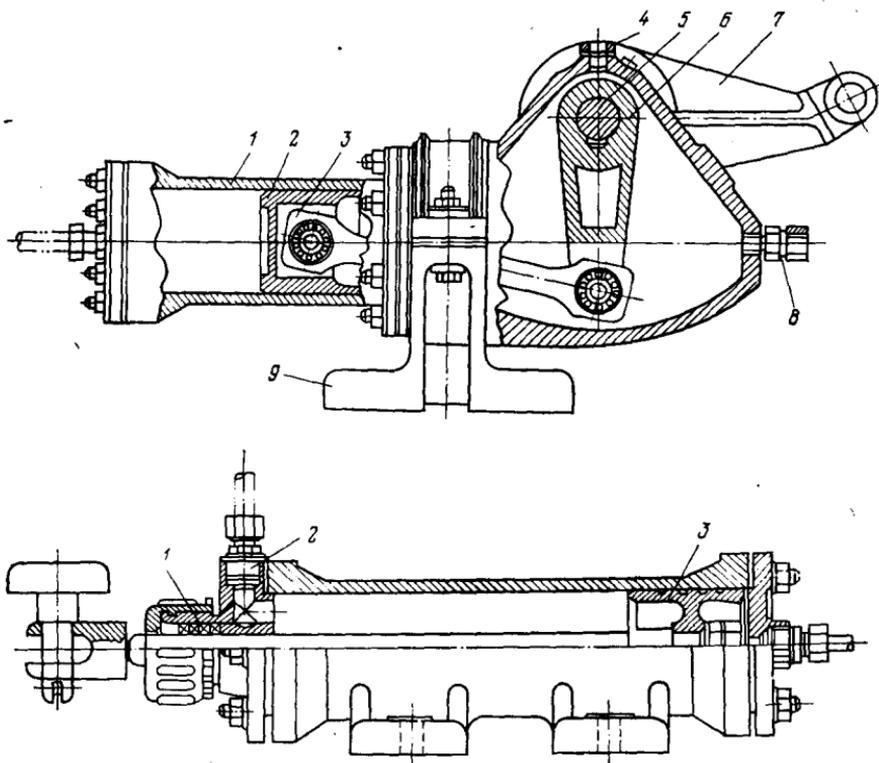


Рис. 11.35. Кривошипный гидравлический исполнительный механизм

схемы регулирования тех или иных объектов, соответствующим образом сочетая отдельные блоки.

На рис. 11.36 показана принципиальная схема регулирования температуры жидкости в аппарате с использованием теплоносителя, проходящего через трубчатый змеевик, помещенный в жидкость. В аппарате установлен ТЭП (термоэлектрический преобразователь) 6, соединенный термоэлектродными проводами с датчиком температуры 5. Сигнал, пропорциональный значению температуры, подводится к регулиющему блоку 4 и вторичному прибору 3. С выхода регулиującego блока сигнал в виде давления сжатого воздуха подается на исполнительное устройство 2, установленное на трубопроводе 1, по которому к объекту подводится теплоноситель (горячая жидкость или водяной пар).

Выходной сигнал регулиującego блока подводится также к вторичному прибору 3 для контроля положения регулиującego органа. От вторичного прибора к регулиющему блоку подводится сигнал задания. Связь переключателя вторичного прибора с отключающим реле регулиującego блока на схеме не показана.

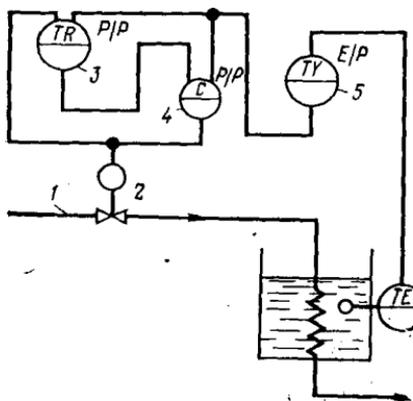


Рис. 11.36. Принципиальная схема регулирования температуры

В качестве чувствительного элемента может быть использован любой ТЭП стандартных градуировок (ХК, ХА или ПП) в зависимости от величины измеряемой (регулируемой) температуры, а измерительным преобразователем может служить Ш-17, измеряющий т. э. д. с. ТЭП и преобразующий ее в пропорциональное

давление сжатого воздуха. В качестве регулирующего блока можно использовать регулятор ПР3.21. Если по техническим условиям допустима статическая ошибка регулирования, то можно применить пропорциональный регулятор ПР2.5.

В качестве вторичного прибора может служить прибор ПВ10.1Э или ПВ10.1П системы Старт. Если же регистрация температуры не требуется, то можно использовать показывающий прибор со станцией управления типа ПВ3.2.

На рис. 11.37 показана принципиальная схема регулирования уровня жидкости в аппарате при помощи регулятора ПР2.5. Датчиком уровня 1 служит уровнемер с пневматическим выходом УБ-П, а регулятором 3 — регулирующий блок ПР2.5. В качестве регулирующего органа служит мембранный клапан 4. Здесь можно ограничиться применением П-регулятора, так как в большинстве случаев к системам регулирования уровня жидкости не предъявляют такое требование, как обеспечение высокой точности регулирования.

Вторичным прибором 2 может служить прибор ПВ3.2. В схемах регулирования уровня обычно не требуется записи значений измеряемой величины, поэтому достаточно иметь показывающий прибор.

На рис. 11.38 показана принципиальная схема регулирования давления в аппарате при помощи регулятора ПР3.31.

В этом случае используется датчик давления типа МП-П или МС-П (в зависимости от величины регулируемого давления) и вторичный прибор ПВ101Э или ПВ101П. Для соединения датчиков с вторичными приборами и регулирующими блоками, а также регуляторов с исполнительными

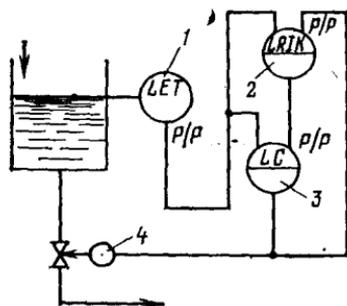
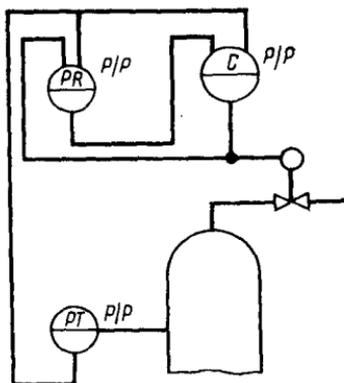


Рис. 11.37. Принципиальная схема регулирования уровня жидкости в аппарате

Рис. 11.38. Принципиальная схема регулирования давления в аппарате

ми механизмами используют медные, полиэтиленовые или полихлорвиниловые трубки диаметром 6—8 мм.

Выбор типа регулятора. Под выбором регулятора фактически понимают выбор необходимого закона регулирования, так как при определенном законе регулирования регуляторы любой конструкции позволяют получить аналогичный переходный процесс в одинаковых по статическим и динамическим свойствам объектах.



Поэтому конкретный тип регулятора и вид используемой в нем энергии зависят от номенклатуры регуляторов и условий эксплуатации. В общем случае выбор регулятора и значений его настроечных параметров определяется динамическими свойствами регулируемого объекта, требованиями, предъявляемыми к качеству регулирования величиной и характером возмущающих воздействий.

Обычные объекты химической технологии являются сложными и обладают самовыравниванием, поэтому их можно рассматривать как динамическую систему, представляющую собой апериодическое звено с запаздыванием. Для оценки же динамических свойств достаточно знать величины коэффициента усиления K_0 , постоянную времени T_0 и время их запаздывания τ .

Возмущающие воздействия характеризуются тремя показателями: местом приложения, величиной и скоростью их изменения. Поскольку характеристики возмущений обычно неизвестны, качество регулирования принято оценивать по реакции САР на наиболее неблагоприятное возмущение — скачкообразное.

При выборе регулятора прежде всего определяют — должен ли это быть регулятор непрерывного или дискретного действия. Наиболее распространенной областью применения Пз-регуляторов являются объекты, имеющие большие постоянные времени (большую инерционность). При наименьших затратах и небольшой величине износа переключающих устройств здесь достигаются результаты, которые лишь в незначительной степени могут быть улучшены при применении регуляторов непрерывного действия.

Практика показывает, что при отношении $(\tau_0/T_0) > 0,2$ и больших изменениях нагрузки Пз-регулятор обеспечивает удовлетворительное качество регулирования. При $0,2 < (\tau_0/T_0) < 1$ лучшее качество регулирования обеспечивают регуляторы непрерывного действия, а при $(\tau_0/T_0) \geq 1$ — регуляторы импульсного действия.

Выбор регулятора непрерывного действия определяется следующими соображениями. Область применения интегральных

регуляторов ограничивается объектами, допускающими относительно большое время регулирования и относительно большое максимальное отклонение регулируемой величины.

П-регуляторы можно применять в тех случаях, когда либо допускается большое время регулирования, либо допускается отклонение регулируемой величины от заданного значения в равновесном состоянии системы. Относительно небольшое время регулирования (меньше $10\tau_0$) при относительно небольшом остаточном отклонении (меньше 10%) может быть получено только в объектах, обладающих относительно небольшим временем запаздывания (при $\tau_0/T_0 < 0,1$).

ПИ-регуляторы можно применять при любых требованиях к величине установившегося отклонения и любом диапазоне возмущающих воздействий, если допустимое время регулирования превышает $6\tau_0$.

Для достижения времени регулирования, меньшего $6\tau_0$, но превышающего $4\tau_0$, необходимо использовать регуляторы с воздействием по производной, т. е. ПИД-регуляторы.

ГЛАВА 12

ПРИНЦИПЫ СОСТАВЛЕНИЯ СХЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ

12.1. СТАДИИ РАЗРАБОТКИ КОНСТРУКТОРСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ

Проектирование систем автоматизации технологических процессов химических производства выполняют в строгом соответствии с требованиями единой системы, конструкторской документации (ЕСКД). Порядок разработки проектной и конструкторской документации регламентирован ГОСТ 2.103—85 ЕСКД «Стадии разработки». В нем установлены стадии разработки конструкторской документации, единая терминология, требования к содержанию и оптимальный объем работ, выполняемых на каждой стадии. В развитие указанного стандарта в дальнейшем были разработаны три стандарта 2.118—73 ЕСКД «Техническое предложение», ГОСТ 2.119—73 ЕСКД: «Эскизный проект», ГОСТ 2.120—73 ЕСКД «Технический проект», что способствовало совершенствованию организации конструкторских работ на проектных стадиях, значительному повышению производительности труда разработчиков, улучшению качественных и технико-экономических показателей выпускаемых изделий.

В систему ЕСКД входят также:

1) ГОСТ 2.104—85 ЕСКД. «Основные надписи», устанавливающий единые формы, размеры, порядок заполнения основных надписей и дополнительных граф к ним для всех конструкторских документов;

2) ГОСТ 2.105—85 «ЕСКД. Общие требования к текстовым документам», устанавливающий общие требования к выполнению текстовых документов на изделия всех отраслей промышленности и строительства;

3) ГОСТ 2.106—85 «ЕСКД. Текстовые документы»;

4) ГОСТ 2.108—85. «ЕСКД. Спецификация»;

5) ГОСТ 2.114—70. «ЕСКД. Технические условия. Правила построения, изложения и оформления», устанавливающие правила выполнения текстовых конструкторских документов, включенных в ГОСТ 2.102—95.

Согласно ГОСТ 2.103—85 предусматриваются четыре стадии разработки конструкторской документации изделий всех отраслей промышленности:

техническое предложение;

эскизный проект;

технический проект;

рабочая документация.

Техническое предложение — совокупность конструкторских документов, которые должны содержать технические и технико-экономические обоснования целесообразности разработки документации изделия на основании анализа технического задания заказчика и различных вариантов возможных решений изделий, сравнительной оценки решений с учетом конструкторских и эксплуатационных особенностей разрабатываемого и существующих изделий и патентные исследования.

Техническое предложение после согласования и утверждения в установленном порядке является основанием для разработки эскизного (технического) проекта. Объем работ регламентирован ГОСТ 2.118—73.

Эскизный проект — совокупность конструкторских документов, которые должны содержать принципиальные конструктивные решения, дающие общее представление об устройстве и принципе работы изделия, а также данные, определяющие назначение, основные параметры и габарит разрабатываемого изделия.

Эскизный проект после согласования и утверждения в установленном порядке служит основанием для разработки технического проекта или рабочей документации. Объем работ регламентирован ГОСТ 2.119—73.

Технический проект — совокупность конструкторских документов, которые должны содержать окончательные технические решения, дающие полное представление об устройстве разрабатываемого изделия, и исходные данные для разработки рабочей документации.

Технический проект после согласования и утверждения в установленном порядке служит основанием для разработки рабочей документации. Объем работ установлен ГОСТ 2.120—73.

Рабочая документация включает корректировку конструкторских документов по результатам изготовления головной (конт-

Таблица 12.1. Обозначения функциональных признаков приборов

Наименование	Обозначение	Назначение
Чувствительный элемент	<i>E</i>	Устройство, выполняющее первичное преобразование, например, сужающее устройство расходомера
Дистанционная передача	<i>T</i>	Приборы бесшкальные с дистанционной передачей, например, дифманометры
Станция управления	<i>K</i>	Приборы, имеющие переключатели выбора вида управления и устройства для дистанционного управления
Преобразование, вычислительные функции	<i>У</i>	Для построения обозначений преобразователей сигналов и вычислительных устройств

рольной) серии. Основные требования к изготовлению рабочих чертежей устанавливает ГОСТ 2.109—85. При разработке рабочих чертежей необходимо предусмотреть:

а) оптимальное применение стандартных и покупных изделий, а также изделий, освоенных производством и соответствующих современному уровню техники;

б) рационально ограниченную номенклатуру марок и сортов материалов, а также применение наиболее дешевых и наименее дефицитных материалов;

в) необходимую степень взаимозаменяемости, наиболее выгодные способы изготовления и ремонта изделий, а также их максимальное удобство при обслуживании и эксплуатации.

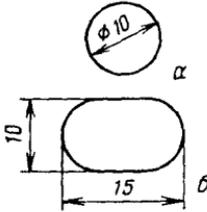
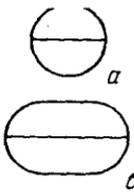
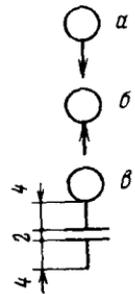
Рабочие чертежи и другие документы, входящие в комплект конструкторской документации, должны содержать все данные, необходимые для изготовления, контроля и испытания.

12.2. ГРАФИЧЕСКОЕ ОФОРМЛЕНИЕ СХЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ

Функциональные схемы автоматизации в проектной документации обычно совмещают с технологическими схемами. При этом применяют условные изображения аппаратов и оборудования и условные изображения средств контроля и регулирования. На схемах показывают связи между ними. Обозначения основных контролируемых и регулируемых величин регламентированы ГОСТ 21.404—85:

Температура	<i>T</i>	Качество, состав, концентрация	<i>Q</i>
Вязкость	<i>V</i>	Электрическая величина	<i>E</i>
Масса	<i>W</i>	Несколько разнородных измеряемых величин	<i>V</i>
Скорость, частота	<i>S</i>	Ручное воздействие	<i>H</i>
Радиоактивность	<i>R</i>	Время, временная программа	<i>K</i>
Плотность	<i>D</i>	Сигнализация	<i>A</i>
Расход	<i>F</i>	Автоматическое регулирование	<i>B</i>
Уровень	<i>L</i>	Автоматическое управление	<i>C</i>
Влажность	<i>M</i>		
Давление, вакуум	<i>P</i>		

Таблица 12.2. Графическое изображение приборов, средств автоматизации и линий связи

Наименование	Обозначение
Прибор, установленный на щите (по месту):	
а -- основное обозначение	
б -- допускаемое обозначение	
Прибор, установленный на щите, пульте:	
а -- основное обозначение	
б -- допускаемое обозначение	
Исполнительный механизм, общее обозначение	
Исполнительный механизм, который при прекращении подачи энергии или управляющего сигнала:	
а - открывает регулирующий орган	
б - закрывает регулирующий орган	
в - оставляет регулирующий орган в неизменном положении	
Исполнительный механизм с дополнительным ручным приводом	
Линия связи. Общее обозначение	
Пересечение линий связи без соединения одной с другой	

Наименование	Обозначение
Пересечение линий связи с их соединением	

Обозначения функциональных признаков приборов должны соответствовать указанным в табл. 12.1. Дополнительные буквенные обозначения, применяемые для построения преобразователей сигналов вычислительных устройств, приведены ниже:

Род энергии сигнала:	
электрический	<i>E</i>
пневматический, гидравлический	<i>P</i>
Виды форм сигнала:	
аналоговый	<i>A</i>
дискретный	<i>D</i>

Графическое обозначение приборов, средств автоматизации и линий связи должно соответствовать приведенному в табл. 12.2.

Отборное устройство для всех постоянно подключенных приборов изображают сплошной тонкой линией, соединяющей технологический трубопровод или аппарат с прибором (рис. 12.1, а). При необходимости указания конкретного места расположения отборного устройства (внутри контура технологического аппарата) его обозначают кружком диаметром 2 мм (рис. 12.1, б).

Правила построения условных обозначений. ГОСТ 21.404—85 устанавливает два метода построения условных обозначений: упрощенный и развернутый. При упрощенном методе построения приборы и средства автоматизации, осуществляющие сложные функции, например контроль, регулирование и сигнализацию, и выполненные в виде отдельных блоков, изображают одним условным обозначением. При этом первичные измерительные преобразователи и всю вспомогательную аппаратуру не изображают.

При развернутом методе построения каждый прибор или блок, входящий в единый измерительный, регулирующий или управляющий комплект средств автоматизации, указывают отдельным условным обозначением.

Условные обозначения приборов и средств автоматизации, применяемые в схемах, включают графические, буквенные и цифровые обозначения. В верхней части графического обозначения наносят буквенные обозначения измеряемой величины и функционального признака прибора, определяющего его назначение. В нижней части графического обозначения наносят циф-

ровое (позиционное) обозначение прибора или комплекта средств автоматизации. Порядок расположения букв в буквенном обозначении установлен следующим:

основное обозначение измеряемой величины;

дополнительное обозначение измеряемой величины (при необходимости);

обозначение функционального признака прибора.

При построении комплектов средств автоматизации первая буква в обозначении каждого входящего в комплект прибора или устройства (кроме устройств ручного управления) является наименованием измеряемой комплектом величины. Буквенные обозначения устройств, выполненных в виде отдельных блоков и предназначенных для ручных операций, независимо от того, в состав какого комплекта они входят, должны начинаться с буквы *H*. Порядок расположения буквенных обозначений функциональных признаков прибора принят с соблюдением последовательности обозначений: *T, R, C, S, A*. При построении буквенных обозначений указывают не все функциональные признаки прибора, а лишь те, которые используют в данной схеме.

Букву *A* применяют для обозначения функции «сигнализация» независимо от того, вынесена ли сигнальная аппаратура на какой-либо щит или для сигнализации используются лампы, встроенные в сам прибор.

Букву *S* применяют для обозначения контактного устройства прибора, используемого только для включения, отключения, переключения, блокировки.

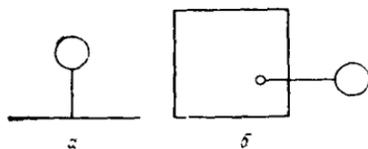
При применении контактного устройства прибора для включения, отключения и одновременно для сигнализации в обозначении прибора используют обе буквы: *S* и *A*.

Предельные значения измеряемых величин, по которым осуществляются, например, включение, отключение, блокировка, сигнализация, допускается конкретизировать добавлением букв *H* и *L*. Эти буквы наносят справа от графического обозначения. При необходимости конкретизации измеряемой величины справа от графического обозначения прибора допускается указывать наименование или символ этой величины. Для обозначения величин, не предусмотренных ГОСТ 21.404—85, допускается использовать резервные буквы. Применение резервных букв должно быть расшифровано на схеме.

Подвод линий связи к прибору изображают в любой точке графического обозначения (сверху, снизу, сбоку). При необходимости указания направления передачи сигнала на линиях

Рис. 12.1. Условное обозначение отборного устройства:

a — общее; *б* — с указанием конкретного места расположения



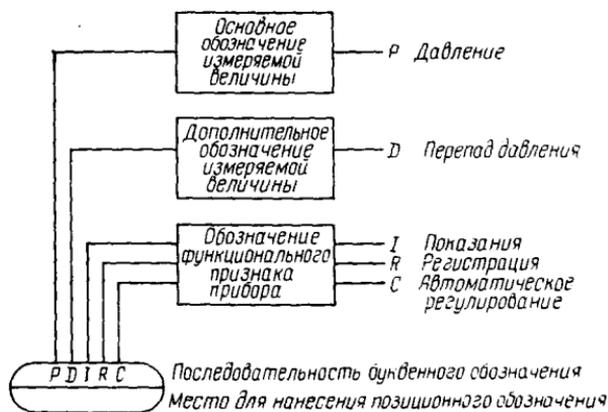


Рис. 12.2. Принцип построения условного обозначения прибора

связи наносят стрелки. Принцип построения условного обозначения прибора показан на рис. 12.2.

Примеры построения условных обозначений приборов и средств автоматизации приведены в табл. 12.3.

12.3. ЩИТЫ И ПУЛЬТЫ

Средства автоматизации устанавливаются либо по месту, т. е. непосредственно у объектов контроля и управления, либо на специальных щитах и пультах, которые монтируют вблизи технологического оборудования или в специальных помещениях таких, как центральный пункт управления или диспетчерская.

Щит — комплектное устройство, состоящее из одного или нескольких скрепленных один с другим шкафов или панелей. Шкафные щиты обычно устанавливают в производственных помещениях, где возможно значительное загрязнение и запыление средств автоматизации. Панельные (открытые) щиты устанавливают в сухих, не запыленных помещениях, где находится только персонал, пользующийся приборами.

Пульт — комплектное устройство, состоящее из одного или нескольких скрепленных один с другим корпусов, имеющих форму стола с горизонтальной или наклонной плоскостью, на которой монтируются средства управления.

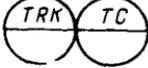
Щиты и пульта в проектах систем автоматизации технологических процессов подразделяются:

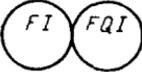
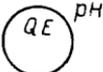
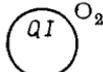
по назначению на:

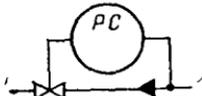
1) оперативные (с которых ведутся управление и контроль технологическим процессом);

2) неоперативные (предназначенные для установки аппаратов, приборов и других устройств, не используемых непосредственно для управления и наблюдения за технологическим процессом);

Таблица 12.3. Условные обозначения приборов и средств автоматизации

Наименование	Обозначение
Первичный измерительный преобразователь температуры (чувствительный элемент), установленный по месту, например, преобразователь термоэлектрический	
Прибор для измерения температуры показывающий, установленный по месту, например, термометр расширения	
Прибор для измерения температуры, установленный на щите, например, потенциометр, логометр	
Прибор для измерения температуры бесшкальный с дистанционной передачей, установленный по месту, например, термометр манометрический бесшкальный с пневматической или электрической передачей	
Прибор для измерения температуры одноточечный, регистрирующий, установленный на щите, например, самопишущий потенциометр	
Прибор для измерения температуры регистрирующий, регулирующий, установленный на щите, например, любой самопишущий регулятор температуры (милливольтметр, потенциометр и т. д.)	
Регулятор температуры бесшкальный, установленный по месту, например, биметаллический регулятор температуры	
Комплект для измерения температуры регистрирующий, регулирующий, снабженный станцией управления, установленный на щите, например, вторичный прибор и регулирующий блок системы Старт	
Прибор для измерения температуры бесшкальный с контактным устройством, установленный по месту, например, реле температурное	
Прибор для измерения расхода бесшкальный с дистанционной передачей показаний, установленный по месту, например, дифманометр с пневмо- или электропередачей	
Прибор для измерения соотношения расходов, регистрирующий, установленный на щите, например, любой вторичный прибор для регистрации соотношения расходов	
Прибор для измерения расхода показывающий, установленный по месту, например, ротаметр	

Наименование	Обозначение
Прибор для измерения расхода показывающий, интегрирующий, установленный по месту, например, показывающий дифманометр с интегратором	
Первичный измерительный преобразователь (чувствительный элемент) для измерения уровня, установленный по месту	
Прибор для измерения уровня с контактным устройством, установленным по месту, например, реле уровня, используемое для блокировки и сигнализации верхнего уровня	
Прибор для управления процессом по временной программе, установленный на щите, например, реле времени	
Прибор для измерения влажности регистрирующий, установленный на щите, например, вторичный прибор влагомера	
Первичный измерительный преобразователь для измерения качества продукта, установленный по месту, например, датчик рН-метра	
Прибор для измерения качества продукта показывающий, установленный по месту, например, газоанализатор показывающий для контроля содержания кислорода в дымовых газах	
Прибор для измерения качества продукта регистрирующий, регулирующий, установленный на щите, например, вторичный самопишущий прибор регулятора концентрации серной кислоты в растворе	
Прибор для измерения нескольких разнородных величин регистрирующий, установленный по месту, например, самопишущий дифманометр, расходомер с дополнительной записью давления. Надпись, расшифровывающая измеряемые величины, наносится справа от прибора	
Прибор для измерения вязкости раствора показывающий, установленный по месту, например, вискозиметр показывающий	
Аппаратура, предназначенная для ручного дистанционного управления (включение, выключение двигателя, открытие, закрытие запорного органа, изменение задания регулятору) и установленная на щите, например, кнопка, ключ управления, задатчик	

Наименование	Обозначение
Прибор для измерения плотности раствора бесшкальный с дистанционной передачей показаний, установленный по месту, например, датчик плотности с пневмо- или электропередачей	
Прибор для измерения давления (разрежения), установленный по месту, например, манометр или дифманометр, тягомер, напорометр и т. д.	
Регулятор давления, работающий без использования постороннего источника энергии (прямого действия) «до себя»	

3) диспетчерские (с которых диспетчер, получающий информацию о состоянии механизмов и основных параметров, характеризующих ход технологических процессов, ведет наблюдение и в случае необходимости принимает меры воздействия на элементы автоматических систем управления этими процессами или передавая нужные распоряжения);

4) управления энергоблоками (с которых осуществляется ручное и автоматическое управление энергооборудованием энергетических установок тепловых электростанций);

по исполнению на:

1) шкафные одиночные щиты, двух- и трехсекционные с задними дверями, а также малогабаритные — в производственных помещениях, а также в щитовых (операторских и диспетчерских) помещениях для установки аппаратуры при наличии особых условий (например, при необходимости установки аппаратуры с открытыми токоведущими частями — щиты питания, шкафы зажимов и т. п.);

2) панельные щиты с каркасом всех типоразмеров и вспомогательные элементы к ним — в диспетчерских и операторских помещениях, в которые имеет доступ персонал, обслуживающий системы автоматизации;

3) шкафные щиты с передней и задней дверями — в качестве релейных и других вспомогательных щитов двухстороннего обслуживания;

4) стивы всех типоразмеров — в качестве конструкции для установки вспомогательной аппаратуры (реле, аппаратура питания, преобразователи, регулирующие и функциональные блоки системы Старт и т. п.), располагаемой в пространстве за щитом в операторских и диспетчерских помещениях. Стивы рекомендуется использовать также в производственных помещениях в качестве конструкций для нетиповой групповой установки датчиков;

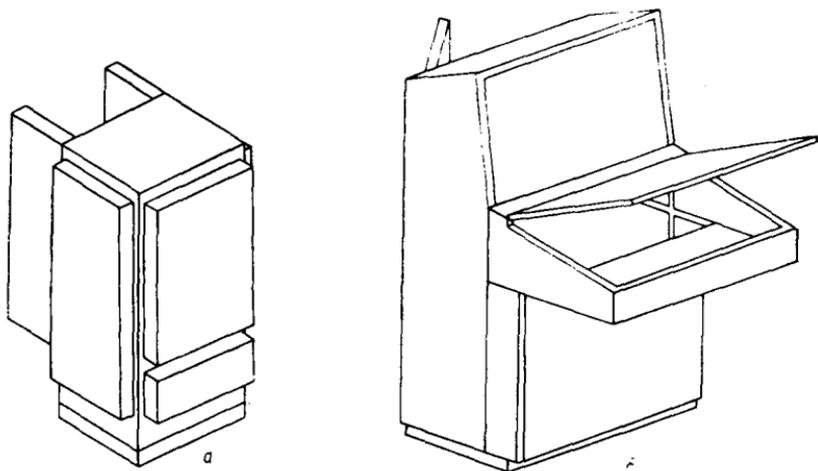


Рис. 12.3. Общий вид:
а — щита; *б* — пульта

б) пульты — в качестве устройств для размещения аппаратуры управления и сигнализации в щитовых и производственных помещениях. Условные наименования и основные размеры регламентированы ГОСТ 36.13—76. На рис. 12.3 показан общий вид щита шкафного типа и пульта, на панелях которых имеются вырезы для установки приборов, и вспомогательных устройств.

Панели щитов и пультов изготавливают из листовой стали толщиной 3—4 мм. Размеры щитов и пультов выбирают в зависимости от следующих данных: числа и размеров аппаратуры, устанавливаемой как снаружи, так и внутри щитов и пультов; места расположения; требований техники безопасности; назначения. При наличии приставного пульта на фасадной стороне щитов размещают показывающие, самопишущие и регулирующие приборы, светосигнальную аппаратуру, а также мнемонические схемы, которые представляют собой упрощенное графическое изображение агрегатов, технологических установок и связей между ними.

На наклонной панели пульта помещают переключатели средств измерения, оперативную аппаратуру управления и сигнализации, показывающие приборы (амперметры, вольтметры и т. п.), допускающие монтаж в наклонном положении.

Средства автоматизации и аппаратуру управления компонуют на щитах функциональными группами в порядке хода технологического процесса. Аппаратуру сигнализации и дистанционного управления приводами, не связанную со средствами автоматизации, рекомендуется компоновать на отдельных щитах. Полногабаритные щиты шкафного и панельного типов, приставные пульты к ним, а также отдельно стоящие пульты в за-

висимости от места их расположения могут быть установлены на бетонном основании или металлическом перекрытии. Малогабаритные щиты шкафного и панельного типов могут быть прикреплены к стене на специальных ригелях. Обычно щиты и пульты изображают в нижней части функциональной схемы автоматизации в виде прямой линии, ниже которой в соответствующих условных обозначениях показывают установленные на этих щитах и пультах приборы.

12.4. ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СХЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ

Функциональная схема систем автоматизации технологических процессов является основным техническим документом, определяющим структуру и характер систем автоматизации технологических процессов, а также оснащение их приборами и средствами автоматизации (в том числе средствами вычислительной техники). В функциональных схемах должны учитываться:

1) состав и содержание задач по контролю и управлению технологическими процессами;

2) организация пунктов контроля и управления, взаимосвязь между местными системами управления отдельными объектами и центральной системой управления.

На функциональной схеме показывают:

1) технологическую схему (схему цепи аппаратов) или упрощенное изображение агрегатов, подлежащих автоматизации, а при наличии блоков агрегатированного оборудования — их изображение;

2) приборы, средства автоматизации и управления, изображаемые условными обозначениями по действующим стандартам, а также линии связи между ними;

3) агрегатированные комплексы, машины централизованного контроля, управляющие вычислительные машины и другие устройства, линии связи с датчиками, преобразователями, исполнительными механизмами, ручной ввод данных в машину;

4) таблицу условных обозначений, не предусмотренных действующими стандартами;

5) необходимые пояснения к схеме.

Функциональные схемы являются основанием для составления ведомостей (перечней) и заказных спецификаций приборов и средств автоматизации. Для сложной технологической системы, которую можно расчленить (без нарушения наглядности) на отдельные технологические узлы, рекомендуется выполнять функциональные схемы этих узлов отдельными схемами или на разных листах одной схемы. В этом случае на взаимосвязанных функциональных схемах дают ссылки на эти схемы или листы.

На первом месте функциональной схемы дается пояснение, на основании какого документа она выполнена. В случае однотипных технологических объектов, не связанных между со-

бой и имеющих одинаковое оснащение средствами автоматизации и одинаковые отдельные щиты, функциональная схема изображается только для одного из них и дается пояснение: «Схема составлена для агрегата №; для агрегатов № и № схемы аналогичны».

Для однотипных технологических объектов, имеющих, например, общие щиты, пульты, рекомендуется показывать на функциональной схеме технологическое оборудование и коммуникации только одного из них, а приборы и средства автоматизации, показываемые в прямоугольниках внизу чертежа, — для всех проектируемых приборов. В этом случае рекомендуются следующие варианты:

1) однотипные приборы и средства автоматизации, имеющие одинаковые значения параметров, показывать в прямоугольниках 1 раз и около их обозначений проставлять общее число в штуках (рис. 12.4, а);

2) однотипные приборы и средства автоматизации, имеющие различные значения параметров, показывать в прямоугольниках, для всех значений объектов. Линии связи, идущие к неизображенным объектам, должны вблизи прямоугольников обрываться, а над ними должна быть приведена поясняющая надпись «От агрегата №» (рис. 12.4, б).

При использовании многоточечного прибора для контроля какого-либо параметра однотипного технологического оборудо-

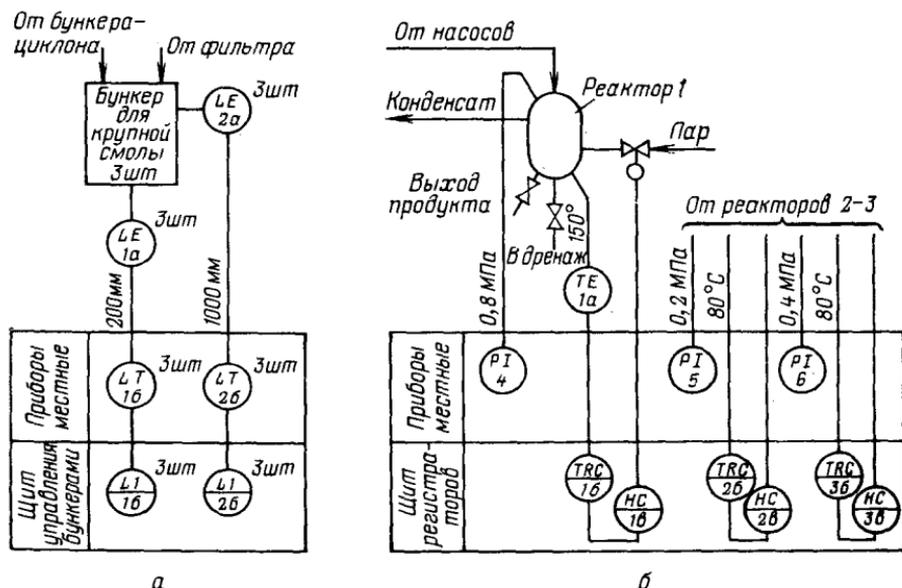
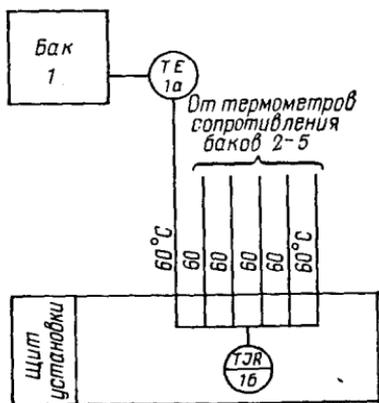


Рис. 12.4. Пример выполнения функциональной схемы для однотипных технологических объектов с приборами, установленными на одном щите:

а — контролируемые параметры имеют одинаковые значения; б — контролируемые параметры имеют различные значения

Рис. 12.5. Пример изображения измерения температуры в нескольких однотипных аппаратах многооточечным прибором при слиянии линий связи



вания на схеме это оборудование показывается 1 раз и 1 раз дается датчик, а к прибору подводятся линии связи от других датчиков (рис. 12.5).

При выполнении функциональной схемы без изображения технологического оборудования рекомендуется вместо него в верхней части схемы наносить прямоугольник, разбитый на вертикальные графы, соответствующие показанным под ними первичным измерительным преобразователям, исполнительным механизмам и т. п. В каждой графе должны быть указаны наименование технологического оборудования, от которого воспринимается технологический параметр, и наименование контролируемого (регулируемого) параметра (рис. 12.6).

Функциональные схемы могут выполняться двумя способами построения условных обозначений — упрощенным и разверну-

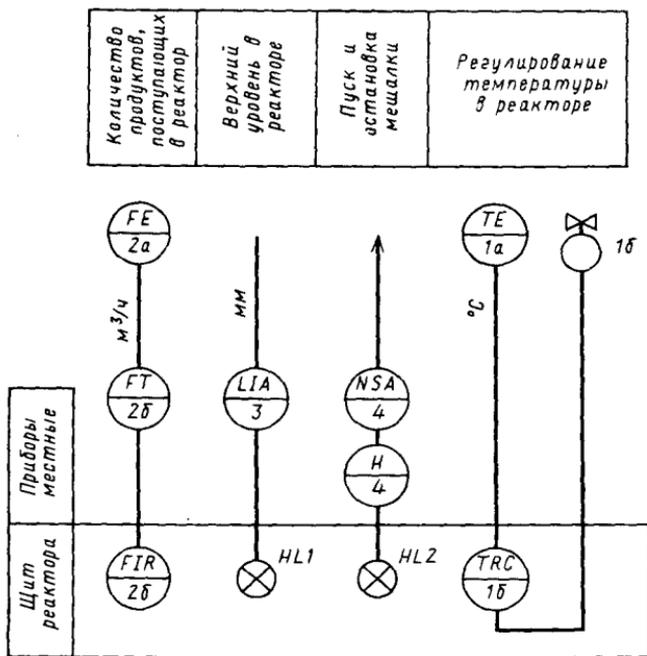


Рис. 12.6. Пример выполнения функциональной схемы без изображения технологического оборудования

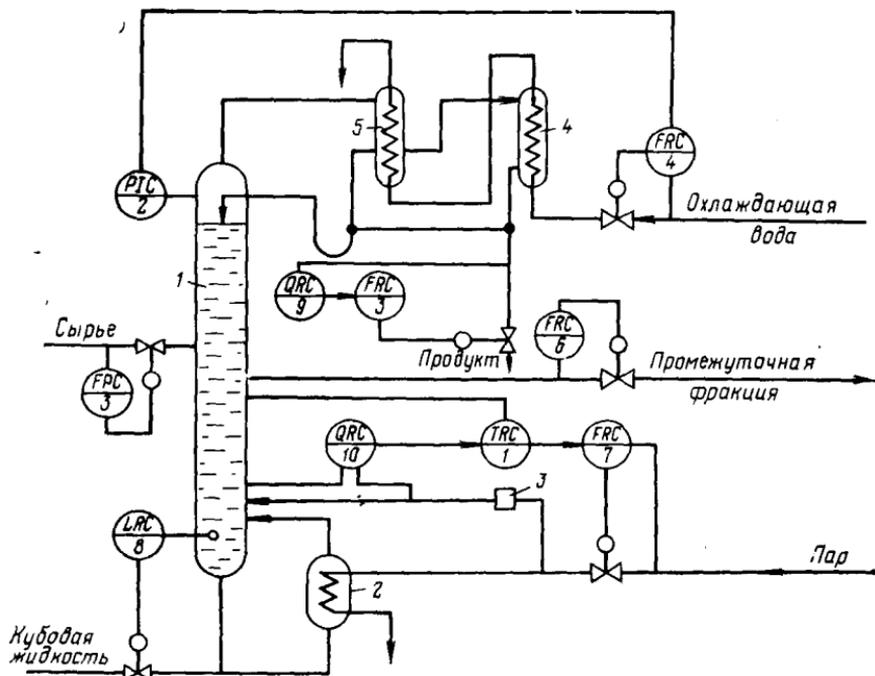


Рис. 12.7. Пример упрощенного способа построения условных обозначений при изображении приборов и средств автоматизации на технологической схеме: 1 - ректификационная колонна; 2 - кипятильник; 3 - редуцирующее устройство; 4 - конденсатор; 5 - дефлегматор

тым. При упрощенном способе построения условных обозначений на функциональных схемах не показываются первичные измерительные преобразователи и вся вспомогательная аппаратура. Упрощенный способ построения условных обозначений рекомендуется применять в основном при изображении приборов и средств автоматизации на технологической схеме (рис. 12.7). Допускается упрощенный способ построения условных обозначений применять при выполнении функциональных схем на стадии проекта.

Развернутый способ построения условных обозначений рекомендуется применять при выполнении функциональных схем на стадиях рабочей документации и рабочего проекта (рис. 12.8).

Чертежи функциональных схем рекомендуется выполнять на местах с форматами в соответствии с ГОСТ 2.301—68 и с учетом внесенных в него изменений СТ СЭВ 1181—78. Все надписи и цифры на функциональных схемах должны выполняться в соответствии с ГОСТ 2.304—81. Каждому устройству, изображенному на функциональной схеме автоматизации, присваивается номер (позиция), который затем проставляется в спецификации. Регламентирована следующая система нумера-

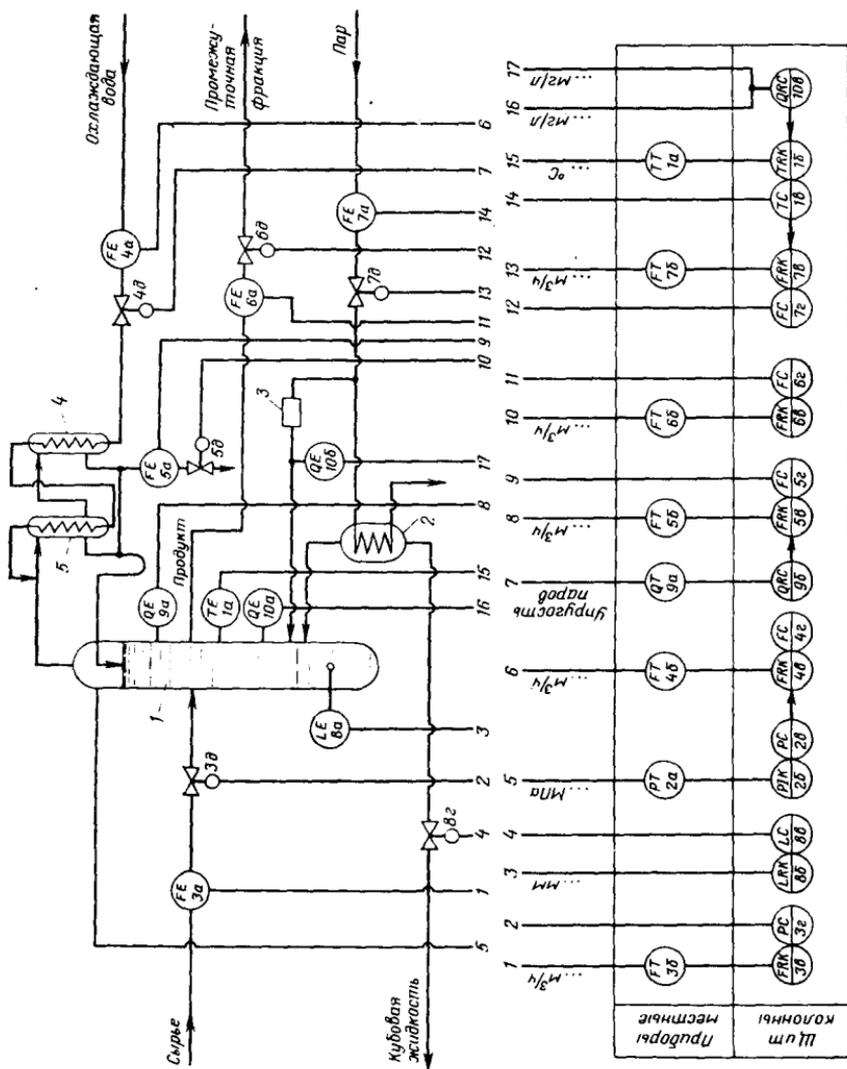


Рис. 128. Пример развернутого способа построения условных обозначений при изображении приборов и средств автоматизации на функциональной схеме (1—5 — то же, что на рис. 12.7)

Таблица 12.4. Условные обозначения трубопроводов для жидкостей и газов

Содержимое трубопроводов	Условное обозначение	Цвет	Содержимое трубопроводов	Условное обозначение	Цвет
Вода	—1—1—	Зеленый	Масло	—14—14—	Коричневый
Пар	—2—2—	Розовый	Жидкое горючее	—15—15—	Желтый
Воздух	—3—3—	Голубой	Противопожарный трубопровод	—26—26—	Красный
Азот	—4—4—	Темно-желтый			
Кислород	—5—5—	Синий	Вакуум	—27—27—	Светло-серый
Аммиак	—11—11—	Серый			
Кислота (окислитель)	—12—12—	Оливковый			
Щелочь	—13—13—	Серо-коричневый			

Примечание. Цветные изображения используют только на эмблосхемах.

ции устройств, выполняющих определенную задачу: присваивается номер по порядку; каждой составной части комплекта — буквенный порядковый индекс. Присвоение буквенных индексов в комплекте аппаратуры производится в следующем порядке: датчик, измерительный или регулирующий прибор, переключатель, сигнальные лампы, регулирующий орган и т. д. На линиях, соединяющих датчики с приборами, установленными на щитах, проставляются рабочие значения измеряемых величин.

Названия технологического оборудования, условно изображенного на функциональной схеме автоматизации, указываются обычно внутри контура, изображающего тот или иной аппарат, а если этот контур невелик, то рядом с ним делается соответствующая запись (например, вентилятор, насос). Условные цветные изображения трубопроводов в зависимости от протекающих в них сред регламентированы ГОСТ 3464—63.

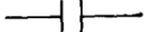
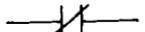
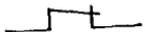
В соответствии с этим ГОСТом по согласованию с заказчиком допускается на функциональных схемах применять условные обозначения трубопроводов для жидкостей и газов в соответствии с табл. 12.4.

На линиях трубопроводов должны быть стрелки, показывающие направление потока вещества соответственно технологической схеме. Трубопроводы, идущие от конечных аппаратов и устройств или подходящие к ним и не снабженные приборами и средствами автоматизации, на схеме обрываются и заканчиваются стрелкой, показывающей направление потока, и поясняются надписью («от фильтра» — «к донейтрализатору»).

12.5. СИГНАЛИЗАЦИЯ И БЛОКИРОВКА

В современных системах автоматического контроля и управления технологическими процессами химических производств значительное место занимают электрические устройства, предназна-

Таблица 12.5. Условные обозначения некоторых элементов электрических схем

Наименование	Обозначение
Лампа накаливания и сигнальная	
Звонок электрический	
Резистор постоянный	
Выключатель кнопочный нажимной: с замыкающим контактом	
с размыкающим контактом	
Конденсатор:	
нерегулируемый	
регулируемый	
Контакт коммутационного устройства:	
замыкающий	
размыкающий	
Диод полупроводниковый	
Катушка электромеханического устройства	

~ 220 В

Схема
автоматизации



Рис. 12.9. Графическое исполнение поясняющих надписей в электрических схемах

ченные для сигнализации об отклонениях параметров процесса и для защиты машин и оборудования от перегрузок и блокировок процесса при недопустимых отклонениях параметров от оптимальных значений. Для изображения вза-

имной электрической связи средств сигнализации защиты и блокировки используют электрические схемы. Условные обозначения некоторых элементов электрических схем даны в табл. 12.5.

По назначению электрические схемы подразделяются на принципиальные, полные и монтажные. Принципиальные электрические схемы сигнализации оформляются в соответствии с требованиями ГОСТ 2.701—76 ЕСКД. На эти схемы наносят поясняющие надписи, например «Цепи световой сигнализации» (рис. 12.9). Против каждой цепи сигнализации дают поясняющую надпись о ее назначении, например «Реле максимальной температуры пара».

При большом числе сигнализируемых величин составляют две самостоятельные схемы — реле сигнализации и сигнальных ламп. В этом случае изменяют лишь общие поясняющие надписи, а именно: для первой схемы реле сигнализации дают надпись: «Цепи реле сигнализации», а для второй: «Цепи светозвуковой сигнализации». Надписи для каждой цепи должны соответствовать ее назначению — «Максимальная температура в паропроводе» и т. д. Над каждой указанной схемой дают общую надпись, соответствующую общим поясняющим надписям. При таком изображении схемы чертежу дается название «Принципиальная электрическая схема сигнализации». Для упрощения схемы сигнализации допускается измерительные схемы сигнализаторов не развертывать, а показывать прямоугольниками.

Для сокращения проектного материала допускается оформлять одну схему сигнализации для различных агрегатов или систем и при различном числе сигнализируемых параметров, если индивидуальные цепи сигнализируемых параметров электрически идентичны. При таком исполнении схему вычерчивают в виде отдельных цепей сигнализируемых параметров, заключенных цепями общих назначений (цепь контроля напряжения, цепь звукового сигнала и т. д.), как это показано на рис. 12.10.

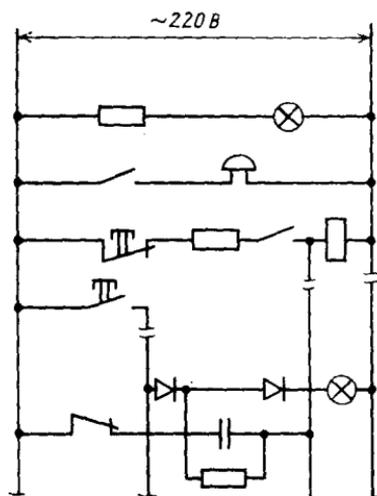
Каждую цепь сигнализируемого параметра можно использовать несколько раз как для каждого агрегата, так и для других агрегатов или систем. Использование цепей сигнализации определяется поясняющими подписями. Если данная цепь не

используется для какого-нибудь агрегата или системы, поясняющая надпись в соответствующем столбце для данного агрегата против этой цепи не нужна. При повторном использовании цепи для данного агрегата или системы в столбце даются поясняющие надписи, сколько параметров сигнализируется по этой схеме.

Если сигнализация имеет особое значение для обеспечения безаварийной работы, схему строят на размыкающихся контактах, что повышает ее надежность работы и исключает случаи непоступления предупредительных сигналов, что в свою очередь обеспечивает контроль за исправностью датчиков. Оформление такой схемы ничем не отличается от оформления рассмотренных выше схем.

Схема сигнализации с применением унифицированных бесконтактных блоков (БА — блок аварийной сигнализации; БПС — блок позиционный сигнализирующий и БОУ — блок общих цепей) оформляется в виде монтажной схемы и сводится к подсоединению внешних цепей (контактов датчиков, сигнальных ламп, кнопок квитирования и проверки, питания и т. п.) к указанным блокам. Внутренние схемы блоков не показывают, но в прямоугольнике приводят сборки зажимов с заводской маркировкой, к которым подсоединяются указанные внешние цепи.

В процессе проектирования разрабатывают схемы блокировочно-защитных цепей. Принципиальные электрические схемы с блокировочными зависимостями или защитными устройствами, как правило, вычерчивают совместно с принципиальными электрическими схемами автоматизации, в которых действуют



Отделение №1		Отделение №2
I система	II система	Контроль наличия напряжения
Контроль наличия напряжения	Контроль наличия напряжения	Звуковой сигнал
Звуковой сигнал	Звуковой сигнал	Звуковой сигнал
Съем звукового сигнала и опробывание сигнальных ламп	Съем звукового сигнала и опробывание сигнальных ламп	Съем звукового сигнала и опробывание сигнальных ламп
Остановка агрегатов		Остановка насоса
Агрегата 1	Агрегата 1	Сборника 1
Агрегата 2	Агрегата 2	Сборника 2
Агрегата 3	Агрегата 3	Сборника 3

Рис. 12.10. Исполнение принципиальной электрической схемы сигнализации при многократном ее использовании

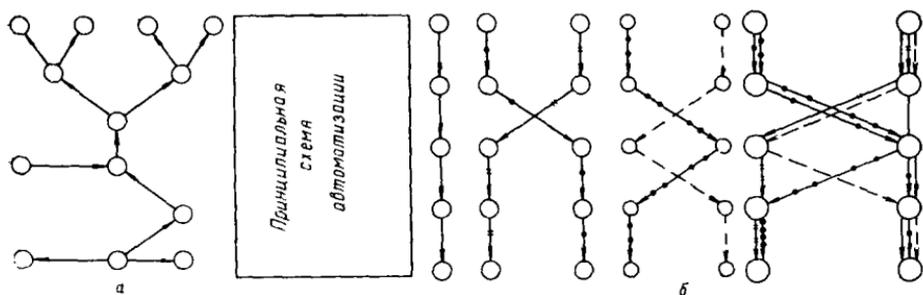


Рис. 12.11. Изображение схем блокировочных зависимостей в электрических схемах автоматизации

эти блокировки или средства защиты. Такие схемы ничем не отличаются по начертанию от электрических схем управления. При выполнении схем управления с блокировками необходимо показать на левой части листа до электрической схемы схему блокировочных зависимостей, как это показано на рис. 12.11, а.

Когда агрегаты с блокировочными зависимостями могут работать по нескольким вариантам, схема этих зависимостей показывается для каждого варианта отдельно (рис. 12.11, б) слева или в совмещенном виде, но для каждого варианта связь блокировочных зависимостей показывается своей условной линией.

На принципиальной электрической схеме управления, в которой предусматривается автоматическое управление агрегатами и механизмами, работающими по заданной программе в циклическом режиме, приводится в правой части листа циклограмма работы этого автоматизированного оборудования. Эта циклограмма графически поясняет схему в отношении установленной последовательности, очередности и длительности работы этих агрегатов. Образец такой циклограммы показан на рис. 12.12.

В схемах защит в поясняющем тексте необходимо указывать значения технологических параметров, при которых они дают импульс на срабатывание защитных устройств. Эти сведения могут быть приведены в виде таблицы.

Если схема блокировочных зависимостей не дает полного представления о действии данного узла автоматизации, то помимо этой схемы приводится на чертеже поясняющая технологическая схема, которая в упрощенном виде раскрывает технологическую суть данного узла и определяет участие в ней заблокированного технологического оборудования (рис. 12.13).

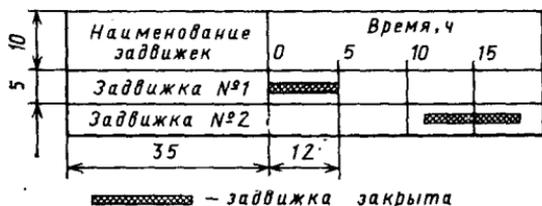
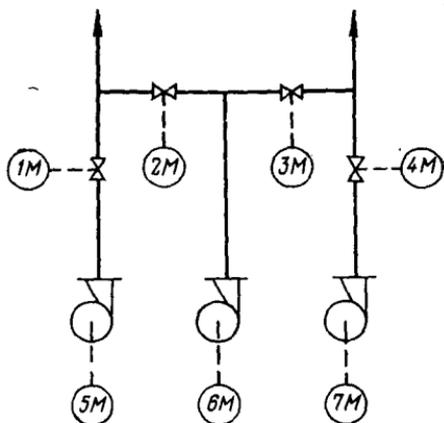


Рис. 12.12. Графическое изображение циклограммы

Рис. 12.13. Технологическая схема, поясняющая блокировочные зависимости



В этих поясняющих схемах необходимо, чтобы позиционное обозначение технологического и электротехнического оборудования соответствовало принятым обозначениям и технологическим и электрическим подразделениям. Циклограммами и поясняющими схемами дополняются принципиальные электрические схемы исключительно для управления сложными процессами; их приводят в тех случаях, когда они необходимы и способствуют более легкому прочтению основных схем управления.

12.6. СОСТАВ ТЕКСТОВЫХ ДОКУМЕНТОВ

Большое и важное место в проектной документации занимают текстовые документы на изделия. Общие требования к выполнению текстовых документов на изделия всех отраслей промышленности и строительства регламентированы ГОСТ 2.105—85. Текстовые документы подразделяются на документы, содержащие в основном сплошной текст (технические условия, технические описания, паспорта, расчеты, пояснительные записки, инструкции и т. п.), и документы, содержащие текст, разбитый на графы (спецификации, ведомости, таблицы и т. п.). Текстовые документы выполняют на формах, установленных соответствующими стандартами Единой системы конструкторской документации (ЕСКД) и Системы проектной документации для строительства (СПДС). Текстовые документы выполняют одним из следующих способов:

машинописный — на одной стороне листа через два интервала;

рукописный — основным чертежным шрифтом по ГОСТ 2.304—81;

типографский — в соответствии с требованиями, предъявляемыми к изданиям, изготовленным типографским способом; с применением печатающих и графических устройств вывода ЭВМ. Особенности выполнения приведены в соответствующих стандартах.

К текстовым документам выпускают лист регистрации изменений в соответствии с ГОСТ 2.503—74 и ГОСТ 21.201—78. Числовые значения величин в тексте должны указываться с необходимой степенью точности. В тексте документа числа с размерностью следует писать цифрами, а без размерности — словами.

Единица физической величины одного и того же параметра в пределах одного документа должна быть постоянной. Если в тексте документа приводится ряд числовых значений, выраженных в одной и той же единице физической величины, то ее указывают только после последнего числового значения, например 1,5; 1,75; 2 м.

ГОСТ 2.106—85 устанавливает формы и правила выполнения следующих документов:

- ведомости спецификаций (ВС) — формы 1 и 1 а;
- ведомости ссылочных документов (ВД) — формы 2 и 2 а;
- ведомости покупных изделий (ВП) — формы 3 и 3 а;
- ведомости технического предложения (ТП) — формы 4 и 4 а;
- ведомости эскизного проекта (ЭП) — формы 4 и 4 а;
- ведомости разрешения применения покупных изделий (ВИ) — формы 6 и 6 а;
- пояснительная записка (ПЗ) — формы 5 и 5 а;
- расчеты (РР) — формы 5 и 5 а.

В ведомость спецификаций записывают: спецификации изделия, спецификации составных частей изделия, спецификации комплектов.

Заполнение ВС производят по разделам в следующей последовательности: вначале сборочные единицы, затем комплекты. В разделе «Сборочные единицы» записывают спецификации сборочных единиц, входящих в состав изделия, а в раздел «Комплекты» — спецификации комплектов (монтажных частей, инструментов, принадлежностей, укладок и пр.).

Форма ведомостей спецификаций приведена на рис. 12.14. Графы ВС заполняют следующим образом: в графе «Обозначение» указывают обозначения спецификаций; в графе «Наименование» — наименование изделий в соответствии со спецификациями; в графе «Куда входит обозначение» указывают обозначения спецификаций, в которые непосредственно входит составная часть изделия. Порядок записи спецификаций аналогичен установленному в ГОСТ 2.108—85. Сами спецификации составляют на отдельных листах для каждой сборочной единицы, комплекса и комплекта. Форма представления приведена на рис. 12.15.

В ведомости «Технологического предложения», «Эскизного проекта» и «Технического проекта» записывают все конструкторские документы, вновь разработанные для данного технического предложения, эскизного и технического проектов и взятые из других проектов и рабочей документации на ранее разработанные изделия. Документы записывают по разделам в следующей последовательности: документация общая; документация по сборочным единицам.

Ведомости разрешения на применение покупных изделий (ВИ) составляют на основании протокола разрешения на применение покупных изделий. Протоколы разрешения к ВИ не

введение (с указанием, на основании каких документов разработан проект);

назначение и область применения проектируемого изделия;

техническая характеристика;

описание и обоснование выбранной конструкции;

описание организации работ с применением разрабатываемого изделия;

ожидаемые технико-экономические показатели;

уровень нормализационной оценки или уровень унификации.

В зависимости от особенностей изделия отдельные разделы допускается объединять или исключать, а также вводить новые разделы. Программу и методику испытаний (ПМ) составляют по тем же формам, что и ПЗ. ПМ должна предусматривать:

• проверку соответствия изделия чертежам, техническим требованиям, паспортным данным и нормам точности;

• определение показателей качества и надежности изделия;

• проверку обеспечения стабильности работы изделия;

• проверку удобства обслуживания и проведения ремонта изделия;

• проверку комплектности изделия;

• проверку соответствия изделия требованиям техники безопасности;

• продолжительность и режим испытаний, а также необходимые измерения во время испытаний.

В методике испытаний необходимо также предусмотреть схемы и средства контроля и указать величину предельных отклонений. Расчеты выполняют также по формам 5 и 5 а, но допускается применять форматы А3 по ГОСТ 2.301—68, при этом основную надпись и дополнительные графы к ней выполняют по ГОСТ 2—104—85 (форма 2 или 2а). Порядок изложения расчетов определяется характером рассчитываемых величин. Расчеты в общем случае должны содержать: эскиз или схему рассчитываемого изделия; задачу расчета (с указанием, что требуется определить при расчете); данные для расчета; расчет; заключение. Эскиз или схему допускается вычерчивать в произвольном масштабе, обеспечивающем четкое представление о рассчитываемом изделии.

УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

ГЛАВА 13

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

13.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ УПРАВЛЕНИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

Под *управлением* необходимо понимать действия, направленные на поддержание или улучшение функционирования объекта управления, в данном случае машины, аппарата или установки, в которых протекает технологический процесс (рис. 13.1).

Такие действия необходимы по той причине, что в любой объект управления в реальных производственных условиях постоянно поступают возмущающие воздействия (возмущения), приводящие к нарушению технологического режима.

Ликвидация и компенсация возмущающих воздействий осуществляется системой управления, включающей в себя комплекс автоматических устройств и оперативный технологический персонал.

13.2. ОБЪЕКТ УПРАВЛЕНИЯ

Все технологические процессы делятся на классы и типы:

<i>Класс процесса</i>	<i>Тип процесса</i>
Гидромеханические	Перемещение жидкостей и газов, разделение неоднородных систем, перемешивание, очистка газов
Тепловые	Нагревание, охлаждение, выпаривание, кристаллизация, искусственное охлаждение
Массообменные	Ректификация, абсорбция, адсорбция, сушка, экстракция
Механические	Измельчение, дозирование, сортировка, перемещение
Химические	Окисление, восстановление, синтез, разложение солей, образование гидроксидов, нейтрализация, дегидратация, электролиз, нитрование, сульфирование, щелочное плавление, алкилирование, полимеризация, омыление, гидрогенизация, перегруппировка, ароматизация, изомеризация, крекинг и др.

Технологические процессы одного типа характеризуются аналогичными зависимостями между параметрами. Это дает возможность разработать принципиальные решения по их автоматизации (см. гл. 14—17).

Технологические процессы, осуществляемые на предприятиях химической и нефтехимической промышленности, характеризуются большим числом различных параметров. Часть из них — *входные параметры* — дает представление о материальных и энергетических потоках на входе в технологический аппарат.

Режимные параметры характеризуют условия протекания процесса внутри аппарата. К *выходным параметрам* можно отнести и сводные экономические показатели процесса, например себестоимость или затраты на производство конечной продукции. Естественно, что требования к выдерживанию режимных и особенно выходных параметров в заданном интервале является обязательным условием проведения технологического процесса.

Совокупность значений всех параметров процесса называют *технологическим режимом*, а совокупность значений параметров, обеспечивающих решение задачи, поставленной при управлении процессом, — *нормальным технологическим режимом*. Нормальный технологический режим задают и оформляют в виде технологической карты. Можно сказать, что управление технологическим процессом сводится к поддержанию параметров на уровне, соответствующем нормальному технологическому режиму.

13.3. СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ

Система управления — совокупность персонала и автоматических устройств, связанных общей задачей управления. Автоматические устройства, входящие в систему управления, по функциональным признакам подразделяются на устройства контро-

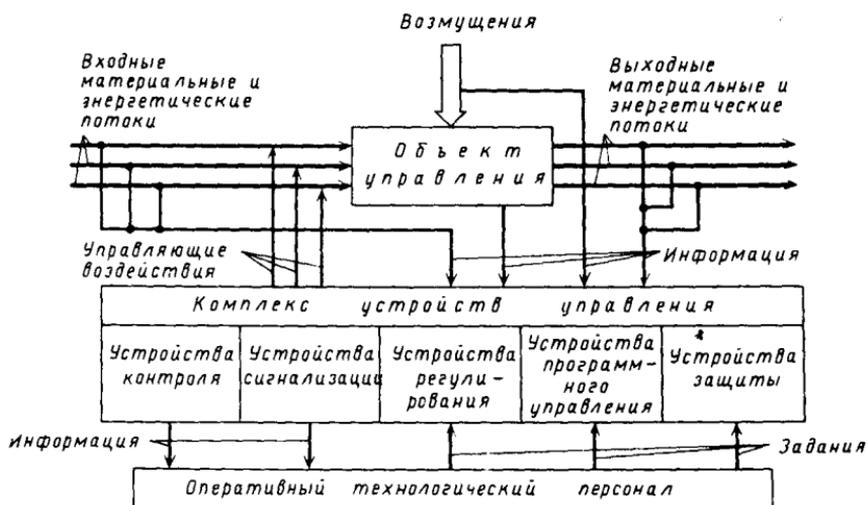


Рис 13.1. Схема управления объектом

ля, регулирования, программного управления, сигнализации и защиты.

Устройства контроля служат для получения и отображения текущих значений параметров процесса.

Устройства регулирования (регуляторы) предназначены для поддержания текущего значения параметра равным заданному (см. раздел II).

Устройства программного управления служат для включения и выключения различных механизмов, машин и аппаратов по заранее заданной временной программе.

Устройства сигнализации предназначены для оповещения оперативного технологического персонала о наступлении тех или иных событий в объекте управления подачей звуковых и (или) световых сигналов.

Различают сигнализацию следующих видов:

предупредительная — предназначена для оповещения персонала об отклонениях параметров за пределы, определяемые нормальным технологическим режимом;

аварийная — предназначена для оповещения персонала о недопустимых значениях параметров или об аварийном отключении одного из аппаратов технологической схемы;

сигнализация положения объекта управления — предназначена для оповещения персонала о состоянии механизмов и машин (включены или выключены), а также о положении запорных органов (открыты или закрыты) в данный момент времени.

Устройства защиты предназначены для предотвращения аварий, пожаров, взрывов, выхода из строя оборудования.

ГЛАВА 14

УПРАВЛЕНИЕ ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

14.1. ПЕРЕМЕЩЕНИЕ ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ

В качестве объекта управления примем трубопровод б, по которому транспортируется жидкость* от аппарата 1 к аппарату 8, и центробежный насос (компрессор) 2 с приводом от асинхронного двигателя 4 (рис. 14.1). Параметром, характеризующим выполнение задачи, поставленной перед установкой перемещения, служит расход перемещаемой жидкости.

Процесс перемещения в химической промышленности является вспомогательным; его необходимо проводить так, чтобы обеспечить эффективный режим основного процесса (химического, массообменного), обслуживаемого данной установкой перемещения. Поэтому необходимо поддерживать определенное, ча-

* Все рассуждения, относящиеся к жидкостям, справедливы и для газов при скорости последних меньше скорости звука.

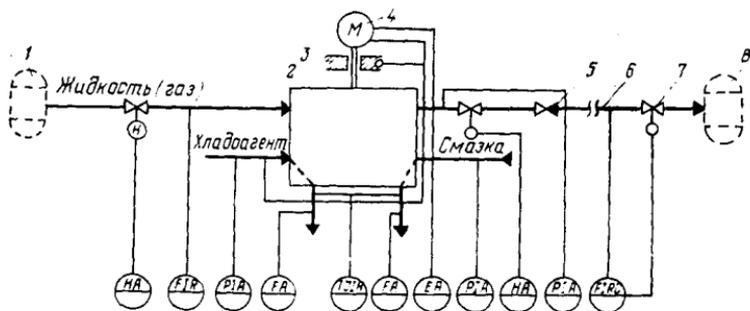


Рис. 14.1. Схема автоматизации процесса перемещения жидкости: 1, 8 — технологические аппараты; 2 — насос (компрессор); 3 — подшипники; 4 — электродвигатель; 5 — обратный клапан; 6 — трубопровод; 7 — дроссельный орган

ще всего постоянное, значение расхода F . Это и будет целью управления установкой перемещения.

Чтобы при наличии возмущений расход F все же был равен заданному, необходимо вносить в объект управления управляющие воздействия, которые будут компенсировать поступившие возмущения. В качестве регулируемой величины здесь необходимо взять сам расход F и формировать управляющие воздействия в зависимости от того, насколько текущее значение расхода отличается от заданного. Наиболее простым способом внесения управляющих воздействий при этом является изменение положения дроссельного органа на трубопроводе нагнетания*, что повлечет за собой изменение его гидравлического сопротивления и общего сопротивления всей системы.

Рассмотрим наиболее распространенные установки перемещения и особенности их автоматизации.

Регулирование при различных целях управления. Часто установкой перемещения необходимо управлять так, чтобы обеспечить стабилизацию какого-либо параметра процесса, предшествующего процессу перемещения или следующего за ним.

Учитывая многообразие процессов химической технологии и задач, которые ставятся при их проведении, можно сказать, что в качестве регулируемой величины при перемещении потоков могут служить любые параметры этих процессов: температура, концентрация, плотность, толщина пленки и т. д.

Регулирование методом дросселирования потока в байпасном трубопроводе. При использовании поршневых насосов (компрессоров) регулирующие органы устанавливать на нагнетательном трубопроводе нельзя, так как изменение степени открытия такого органа приводит лишь к изменению давления в нагнетательной линии; расход же практически остается постоянным.

* Устанавливать дроссельный орган на трубопроводе всасывания не рекомендуется, так как это может привести к кавитации и быстрому разрушению лопаток насоса.

В этих случаях регулирование может быть осуществлено дроссельным органом, установленным на байпасной линии, соединяющей всасывающий и нагнетательный трубопроводы. Такое же регулирование применяют при использовании шестеренчатых и лопастных насосов.

Регулирование изменением числа оборотов вала насоса. Дроссельное регулирование имеет существенный недостаток — низкую экономичность, так как потери на регулирующем органе при дросселировании жидкости уменьшают к. п. д. насоса. Более экономичен метод регулирования — изменение числа оборотов рабочего вала насоса.

Наиболее эффективным методом изменения числа оборотов вала насоса является использование вариаторов и муфт скольжения, которые позволяют изменять число оборотов рабочего вала насоса при неизменном числе оборотов вала электродвигателя.

14.2. СМЕШЕНИЕ ЖИДКОСТЕЙ

Разработаем основные решения по автоматизации процесса смешения на примере емкости, в которой смешиваются две жидкости *A* и *B* (рис. 14.2). В качестве показателя эффективности процесса перемешивания примем концентрацию искомого компонента в смеси ($Q_{см}$), а целью управления — получение смеси с определенной концентрацией этого компонента. Концентрация искомого компонента в смеси зависит от расходов жидкостей *A* и *B*, а также от концентрации в них искомого компонента.

Итак, в смеситель могут поступать возмущающие воздействия, поэтому следует регулировать непосредственно концентрацию $Q_{см}$, внося регулирующие воздействия изменением одного из расходов жидкостей.

В смесителе необходимо иметь определенный объем жидкости. Существенное изменение объема жидкости может привести к переполнению аппарата или его опорожнению, при этом процесс смешения становится невозможным. Показателем объема жидкости является уровень в аппарате, поэтому его необходимо стабилизировать. Отметим, что, осуществляя регулирующие воздействия, регулятор уровня создает возмущения для регулятора концентрации $Q_{см}$.

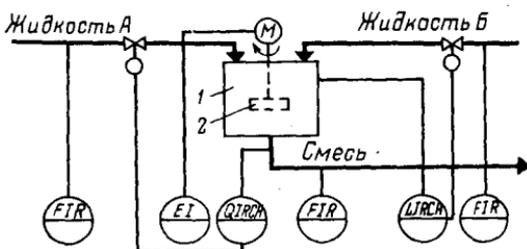
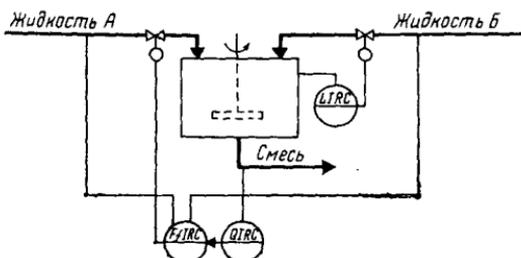


Рис. 14.2. Схема автоматизации процесса смешения жидкостей:
1 — емкость; 2 — механическая мешалка

Рис. 14.3. Схема регулирования процесса смешения при значительных изменениях расхода одной из жидкостей



Для успешной эксплуатации смесителя, оперативного управления им и подсчета технико-экономических показателей следует контролировать концентрацию $Q_{см}$,

расходы жидкостей и смеси, уровень жидкости в смесителе и количество энергии, потребляемой приводом мешалки.

Регулирование уровня изменением расхода смеси. Если расход смеси не обусловлен ходом последующего технологического процесса, то его нужно использовать для регулирования уровня в смесителе — качество регулирования уровня при этом улучшится по сравнению с качеством регулирования по вышеописанному варианту.

Регулирование регулятором соотношения. Если расход жидкостей сильно изменяется, то для улучшения качества регулирования следует использовать регулятор соотношения расходов жидкостей с коррекцией по концентрации смеси $Q_{см}$ (рис. 14.3). Регулирование соотношения расходов жидкости компенсирует возмущения по расходу жидкости *Б*, что обеспечивается изменением расхода жидкости *А* до того, как изменится концентрация $Q_{см}$.

При постоянных концентрациях компонента в жидкостях *А* и *Б* возможно регулирование соотношения расходов без автоматической коррекции величины соотношения.

14.3. ОСТАИВАНИЕ ЖИДКИХ СИСТЕМ

Основные принципы управления при автоматизации процессов отстаивания рассмотрим на примере отстойника со скребковым устройством (рис. 14.4). Показателем эффективности процесса будем считать концентрацию твердой фазы в осветленной жидкости, а целью управления — поддержание ее на заданном значении.

В объект управления процесса разделения могут поступать многочисленные возмущающие воздействия: изменение расхода суспензии, плотностей твердой и жидкой фаз, концентрации и вязкости суспензии, дисперсности (гранулометрического состава) твердой фазы. Особенно сильными возмущениями являются изменения расхода суспензии и концентрации твердой фазы в ней.

Рассмотрим, каким образом при наличии перечисленных возмущений можно достичь цели управления. На твердую частицу суспензии в отстойнике действуют одновременно силы инерции и тяжести. Поэтому истинное значение скорости v дви-

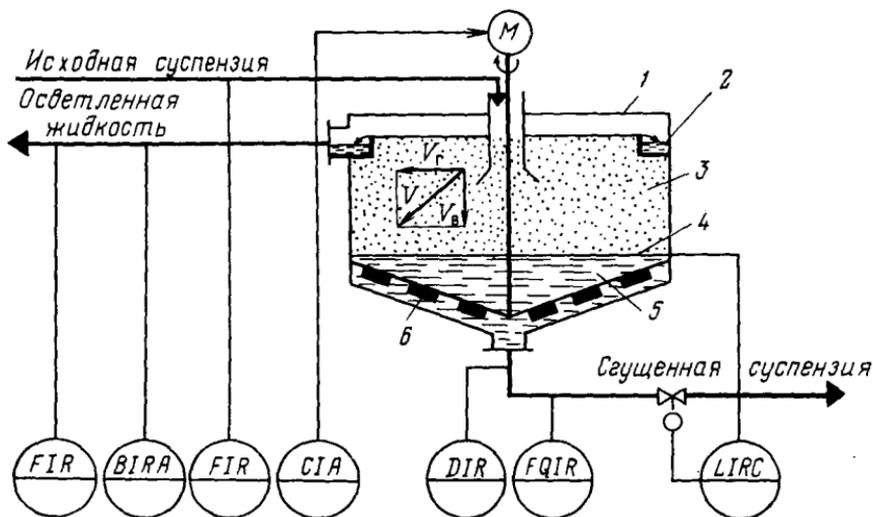


Рис. 14.4. Схема автоматизации процесса отстаивания:

1 — отстойник; 2 — переливное устройство; 3 — зона осаждения; 4 — граница раздела; 5 — зона уплотнения; 6 — мешалка

жушейся частицы является результирующей горизонтальной составляющей скорости v_r и вертикальной составляющей v_b , а положение частицы определяется отношением этих скоростей: если $v_b \gg v_r$, то частица оседает в бункер отстойника; если же $v_r \gg v_b$, то частица уносится в выходной патрубок. Скорость v_b является переменной величиной, зависящей от изменяющихся во времени параметров: диаметра частиц, концентрации твердой фазы, плотностей фаз, динамической вязкости суспензии. Чтобы при изменяющейся скорости осаждения частицы успевали оседать в бункер, подбирают такие значения расхода суспензии и диаметра отстойника, которые обеспечивают нужное соответствие скоростей v_b и v_r .

Уровень жидкости в отстойнике поддерживается постоянным, так как осветленная жидкость свободно переливается из него.

В отстойнике необходимо поддерживать на постоянной высоте границу раздела зон осаждения и уплотнения. Эта высота зависит от расхода сгущенной суспензии, поэтому регулирующее воздействие вносится изменением степени открытия специальных клапанов (для высоковязких жидкостей) на линии сгущенной суспензии.

В качестве контролируемых величин принимают расходы исходной и сгущенной суспензий, осветленной жидкости, а также мутность осветленной жидкости, которая является косвенным параметром, характеризующим показатель эффективности и плотность сгущенной суспензии. Контролируется, кроме того, уровень границы раздела зон при помощи гидростатического

приемника с непрерывной промывкой. Работа механической части отстойников контролируется непосредственным измерением момента на валу двигателя.

14.4. ЦЕНТРИФУГИРОВАНИЕ ЖИДКИХ СИСТЕМ

В качестве объекта управления при автоматизации процесса центрифугирования рассмотрим центрифугу непрерывного действия (рис. 14.5). Полученный в результате центрифугирования осадок в дальнейшем, как правило, поступает в сушилку, энергетические затраты которой определяются в основном влажностью осадка, поэтому при управлении центрифугами ставится задача получения заданной (минимально возможной при данных условиях) влажности осадка (она может колебаться, например, при отстойном центрифугировании от 10 до 30%). Это и будет являться целью управления.

Наиболее сильным возмущающим воздействием является изменение подачи суспензии.

Для компенсации сильных возмущений, вызванных изменением расхода суспензии, предусматривают узел стабилизации этого параметра. Для поддержания материального баланса в центрифуге не требуются регуляторы, так как уровень фугата и осадка поддерживается свободным удалением их из аппарата. Стабилизация расхода суспензии и соблюдение баланса обеспечивают постоянную производительность центрифуги.

Особое внимание уделяют контролю, сигнализации и защите параметров центрифугирования, что обусловлено высокими скоростями вращения центрифуг, большим потреблением энергии, а также возможностью неравномерного распределения материала в барабане центрифуги.

Управление центрифугами периодического действия. Центрифуги периодического действия находят широкое применение в промышленности, так как они просты по конструкции. Регули-

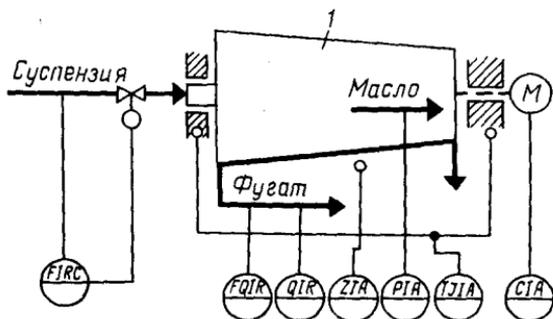


Рис. 14.5. Схема автоматизации процесса центрифугирования жидких систем: 1 — барабан центрифуги; С — момент на валу электродвигателя; Z — уровень вибрации

рующие воздействия в них могут быть внесены изменением продолжительности отдельных операций в зависимости от влажности осадка. Однако на практике, поскольку отсутствуют датчики влажности, процесс ведут по жесткой временной программе, используя для этого командный прибор.

14.5. ФИЛЬТРОВАНИЕ ЖИДКИХ СИСТЕМ

В качестве объекта управления при фильтровании жидких систем примем барабанный (дисковый) вакуум-фильтр (рис. 14.6). Фильтровальные аппараты, как правило, играют ту же роль, что и центрифуги, поэтому и цели управления в обоих случаях совпадают.

Серьезной опасностью при работе вакуум-фильтров является прорыв фильтровальной ткани, так как через отверстия в ней теряется целевой продукт. Для предотвращения таких ситуаций устанавливают датчики мутности фильтрата, а также устройства сигнализации и защиты. Кроме того, на вакуум-фильтре предусматривают еще один датчик сигнализации и защиты — датчик перегрузки электродвигателя барабана.

Контролю подлежат расходы суспензии и фильтрата, уровень жидкости в ванне, разрежение в вакуум-линии, перепад давления до и после фильтровальной ткани, мутность фильтрата, мощность электродвигателя.

Регулирование толщины осадка. Толщина осадка является важнейшим режимным параметром. Увеличение толщины приводит к значительному повышению влажности осадка, поэтому целесообразна стабилизация этого параметра. С этой целью регулирующие воздействия могут быть внесены как изменением вакуума, так и изменением скорости вращения барабана.

14.6. ФИЛЬТРОВАНИЕ ГАЗОВЫХ СИСТЕМ

Объектом управления в данном случае будет рукавный фильтр с импульсной продувкой (рис. 14.7).

Процесс фильтрования газовых сред во многом аналогичен

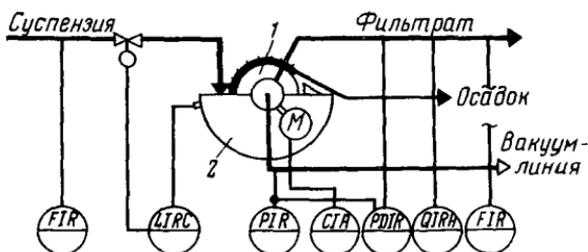


Рис. 14.6. Схема автоматизации процесса фильтрования жидких систем: 1 — барабан (диск); 2 — ванна; С — момент на валу электродвигателя

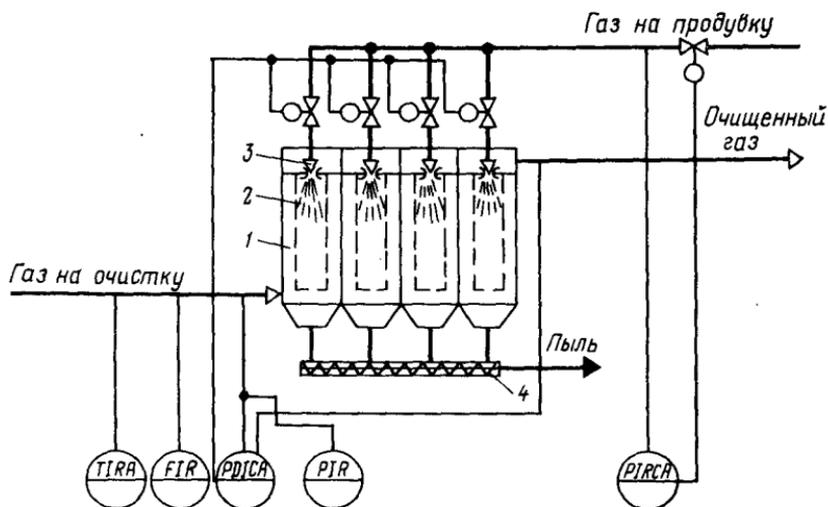


Рис. 14.7. Схема автоматизации процесса фильтрации газовых систем:
 1 — корпус фильтра; 2 — рукава; 3 — сопло импульсной продувки; 4 — шнек

процессу фильтрации жидких систем. В частности, аналогичны возмущающие воздействия и возможности их ликвидации. В рукавные фильтры дополнительно могут поступать возмущения по каналу сжатого воздуха, подаваемого в сопла для регенерации. Некоторые сложности при автоматизации рукавных фильтров создает отсутствие в настоящее время надежных концентратометров пыли. Поэтому регулируют перепад давления ΔP в камерах загрязненного и очищенного газа, который наиболее полно отражает ход процесса. Регулировать перепад давления ΔP можно изменением массы пыли, осевшей на фильтровальную ткань. Это осуществляется следующим образом.

При достижении максимального перепада позиционный регулятор выдает сигнал на электромагнитные клапаны, установленные на магистрали сжатого воздуха. Клапаны открываются, импульсы сжатого воздуха через сопла поступают в рукава и деформируют ткань, сбивая при этом пыль. Регенерация ткани происходит до достижения минимального перепада давления. При отсутствии датчика измерения перепада давления регенерация фильтровальной ткани может осуществляться по жесткой временной программе, заложенной в командный прибор.

Контролю и сигнализации подлежат следующие параметры: температура загрязненного газа (фильтровальная ткань рассчитана только на определенные температуры), давление сжатого воздуха, перепад давления.

УПРАВЛЕНИЕ ТЕПЛОВЫМИ ПРОЦЕССАМИ

15.1. НАГРЕВАНИЕ ЖИДКОСТЕЙ

Основные принципы управления процессом нагревания рассмотрим на примере поверхностного кожухотрубчатого теплообменника (рис. 15.1), в который подают нагреваемый продукт и теплоноситель. Показателем эффективности данного процесса является температура t''_n продукта на выходе из теплообменника, а целью управления — поддержание этой температуры на определенном уровне.

Проанализируем объект управления, чтобы определить возможные управляющие и возмущающие воздействия.

Расход теплоносителя F_T можно легко стабилизировать или использовать для внесения эффективных регулирующих воздействий. Расход продукта F_n определяется другими технологическими процессами, а не процессом нагревания, поэтому он не может быть ни стабилизирован, ни использован для внесения регулирующих воздействий; при изменении расхода F_n в теплообменник будут поступать сильные возмущения. Начальные температуры продукта t'_n и теплоносителя t'_T , а также их удельные теплоемкости c_n и c_T определяются технологическими режимами других процессов, поэтому стабилизировать их при ведении процесса нагревания невозможно. К неликвидируемым возмущениям относится также изменение температуры окружающей среды и свойств теплопередающей стенки вследствие отложения солей, а также коррозии.

Анализ объекта управления показал, что большую часть возмущающих воздействий невозможно устранить. Поэтому сле-

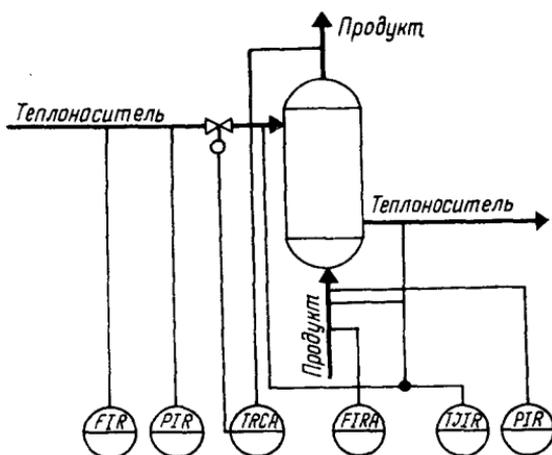


Рис. 15.1. Схема автоматизации процесса нагревания

дует в качестве регулируемой величины выбрать температуру t''_n , а регулирующее воздействие оказывать изменением расхода F_T .

В качестве контролируемых величин следует принимать расходы теплоносителей, их конечные и начальные температуры, давления. Знание текущих значений этих параметров необходимо для нормального пуска, наладки и эксплуатации процесса. Расход требуется знать также для подсчета технико-экономических показателей процесса, а расход F_n и температуру t''_n — для оперативного управления процессом.

Сигнализации подлежат температура t''_n и расход продукта. Поскольку резкое падение расхода F_n может послужить причиной выхода из строя теплообменника, устройство защиты в этом случае должно перекрывать линию горячего теплоносителя.

Каскадно-связанное регулирование. Использование двухконтурных САР позволяет значительно улучшить качество регулирования конечной температуры продукта, если вспомогательной регулируемой величиной выбрать параметр, изменение которого будет сильным возмущением для процесса теплообмена. Часто в качестве вспомогательного параметра выбирают расход теплоносителя (рис. 15.2). Если теплоносителем служит пар с переменным давлением, то предпочтительнее брать давление теплоносителя или давление в межтрубном пространстве.

Регулирование процесса байпасированием продукта. Для регулирования систем, в которых изменение расхода теплоносителя недопустимо, используют метод байпасирования (рис. 15.3). Регулирующее воздействие в этих случаях осуществляется из-

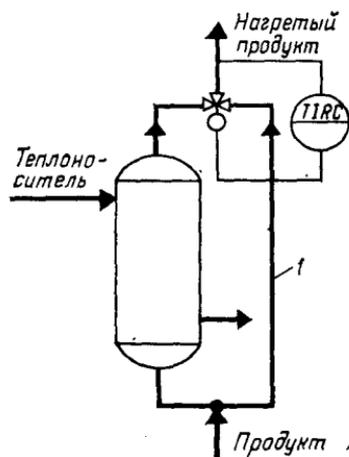
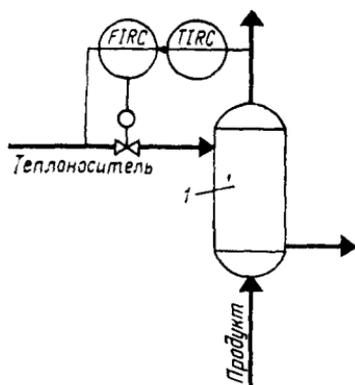


Рис. 15.2. Двухконтурная система регулирования процесса нагрева (I — теплообменник)

Рис. 15.3. Схема регулирования температуры изменением расхода продукта в байпасном трубопроводе с использованием трехходового клапана (I — байпас)

менением соотношения расходов байпасируемого и основного потоков.

Регулирование процесса в теплообменниках смешения. Малейшие изменения параметров теплоносителя при непосредственном смешении двух и более жидкостей приводят к значительным и быстрым изменениям конечной температуры продукта, поэтому при управлении теплообменниками смешения часто применяют связанное регулирование и регулирование соотношения расходов теплоносителя и продукта с коррекцией по температуре продукта.

Регулирование работы трубчатых печей. В нефтехимической промышленности широкое применение находят трубчатые печи, в которых продукт, непрерывно прокачиваемый через змеевик, нагревается теплом, выделяющимся при сжигании топлива.

Компенсация всех воздействий достигается изменением количества подаваемого в печь топлива. Поскольку для трубчатой печи характерны большие запаздывания (20—30 мин по каналу расход топлива — конечная температура продукта), целесообразно использовать связанное регулирование (рис. 15.4). В этом случае система управления обеспечивает регулирование температуры продукта на выходе из печи с учетом изменений температуры над перевальной стенкой и расхода нагреваемого продукта.

Регулирование процесса в топках. При сушке, выпаривании, обжиге и других процессах в качестве теплоносителя часто используют топочные газы, получаемые в топках при сжигании топлива. В зависимости от требований, предъявляемых к топочному газу, в промышленности используют топки разных конструкций. Наиболее распространенной является топка (рис. 15.5) с принудительной подачей воздуха в зону горения (первичного воздуха). Расход топлива в этом случае изменяется в зависимости от температуры (или какого-либо другого параметра) того процесса, в котором используют полученные топочные га-

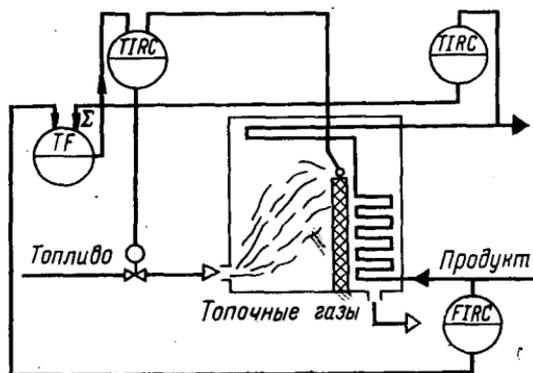


Рис. 15.4. Схема связанного регулирования процесса в трубчатой печи

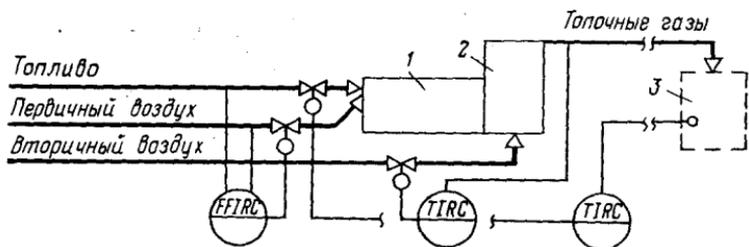


Рис. 15.5. Схема регулирования топки с принудительной подачей первичного воздуха:

1 — топка; 2 — смешительная камера; 3 — технологический аппарат

зы. Соотношение расходов топлива и первичного воздуха поддерживают постоянным. Температуру топочных газов сразу после топки регулируют изменением расхода вторичного воздуха.

15.2. ВЫПАРИВАНИЕ

Основные принципы управления процессом выпаривания рассмотрим на примере однокорпусной выпарной установки естественной циркуляции (рис. 15.6). Показателем эффективности процесса служит концентрация упаренного раствора $Q_{y.p.}$, а целью управления — поддержание определенного значения этой концентрации.

Расход свежего раствора $F_{с.р.}$ можно стабилизировать или изменять для достижения цели управления процессом выпаривания, так как этот процесс в большинстве случаев является основным в химических производствах. Так, его уменьшение приводит к снижению скорости движения раствора по аппарату, а следовательно — к увеличению концентрации $Q_{y.p.}$. То же можно сказать и о расходе упаренного раствора.

Концентрация свежего раствора определяется предшествующими технологическими процессами; ее изменения будут сильными возмущениями для процесса выпаривания. Расход паров растворителя определяется параметрами исходного раствора, а также режимными параметрами в аппарате.

Если предположить, что цель управления достигнута, т. е. концентрация $Q_{y.p.}$ на выходе из аппарата постоянна и соответствует заданной, то между температурой и давлением в аппарате будет соблюдаться определенная зависимость. Поэтому достаточно стабилизировать только один из этих параметров. В большинстве случаев — это давление в аппарате, которое можно регулировать изменением отбора пара из аппарата.

Концентрацию $Q_{y.p.}$ в настоящее время определяют по разности температур кипения раствора и растворителя (по температурной депрессии). О ее значениях можно судить и по другим косвенным параметрам: плотности, удельной электропроводности, показателю преломления света или температуре замерзания упаренного раствора.

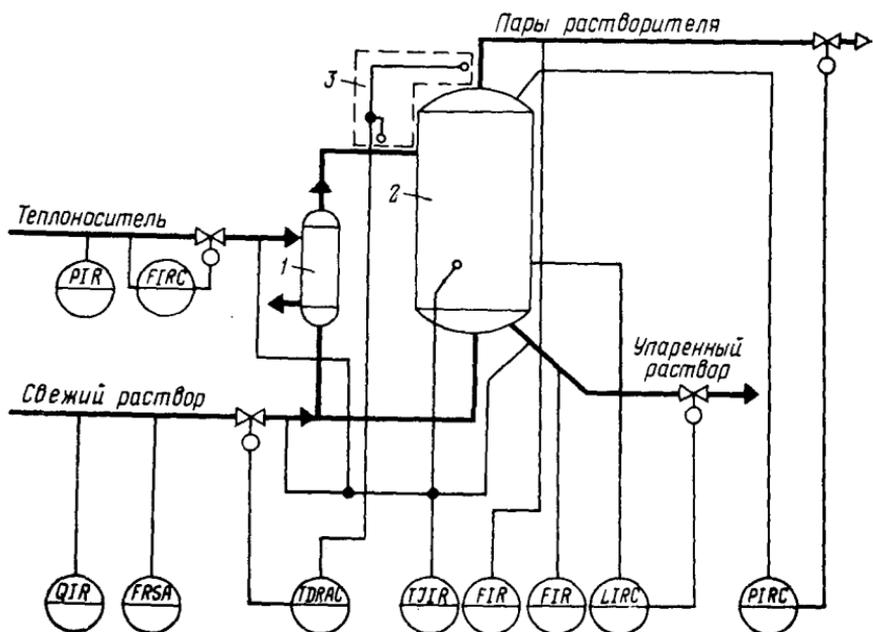


Рис. 15.6. Схема автоматизации процесса выпаривания:

1 — кипятник; 2 — выпарной аппарат; 3 — устройство для измерения температурной депрессии

Итак, для достижения цели управления процессом следует регулировать температурную депрессию, давление в аппарате и расход теплоносителя.

Для поддержания материального баланса в аппарате необходимо регулировать уровень раствора изменением расхода упаренного раствора.

В процессе выпаривания контролируют расходы растворов, а также паров растворителя; температуры растворов; температуру, давление и расход теплоносителя; давление, температуру и уровень в аппарате; температурную депрессию. Сигнализации подлежат отклонение концентрации $Q_{\Sigma p}$ от заданного значения и прекращение подачи раствора.

Управление выпарными аппаратами периодического действия. Операция выпарки в этих аппаратах осуществляется при стабилизации уровня изменением расхода свежего раствора до достижения температурной депрессией заданного значения. При срабатывании реле температурной депрессии устройство управления дает сигнал на открытие магистралей упаренного раствора и закрытие магистралей свежего раствора и теплоносителя, что достигается прекращением питания регуляторов уровня и давления (давление в аппаратах периодического действия регулируется изменением расхода теплоносителя).

Регулирование работы многокорпусных и многоступенчатых установок. При управлении процессом выпаривания в установках такого типа стабилизируют концентрацию $Q_{y.p}$ в последнем аппарате изменением расхода упаренного раствора. Уровень во всех аппаратах при таком способе стабилизации величины концентрации регулируется изменением расхода раствора, подаваемого в аппарат.

Стабилизация давления в аппаратах установки обеспечивается самостоятельными регуляторами давления, сбрасывающими часть пара в общую линию паров растворителя.

15.3. КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ

Основные принципы управления процессом кристаллизации рассмотрим на примере кристаллизатора с выносным холодильником (рис. 15.7). Показателем эффективности процесса служит размер полученных кристаллов. Для обеспечения текучести и неслеживаемости кристаллических веществ необходимо получать кристаллы одинакового размера, что и является целью управления. Размер кристаллов, с одной стороны, определяется условиями, при которых проводится процесс (температурой в аппарате, интенсивностью охлаждения и перемешивания раствора), а с другой — свойствами поступающего на кристаллизацию раствора (степенью насыщения твердой фазой, т. е. начальной концентрацией, а также температурой, содержанием примесей и т. д.).

Постоянство температуры в кристаллизаторе можно обеспечить, изменяя расход хладонносителя. Интенсивность охлаждения раствора при постоянной температуре в аппарате определяется скоростью прохождения раствора через аппарат. Для поддержания ее на постоянном значении стабилизируют расход раствора. Интенсивность перемешивания раствора в кристаллизаторе при использовании насоса с постоянной характеристикой

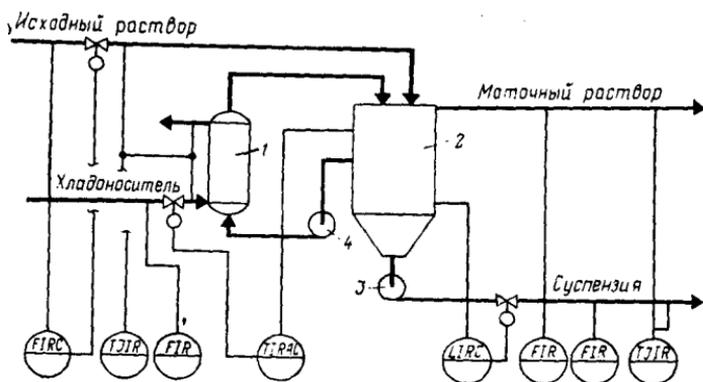


Рис. 15.7. Схема автоматизации процесса кристаллизации:

1 — холодильник; 2 — кристаллизатор; 3 — насос суспензии; 4 — циркуляционный насос

можно считать постоянной. Концентрация твердой фазы в исходном растворе, его температура и наличие примесей являются начальными параметрами процесса, определяемыми предыдущим технологическим процессом. Их изменения будут приводить к нарушению технологического режима кристаллизации.

Для поддержания материального баланса кристаллизатора следует стабилизировать уровень в аппарате. Регулирующим воздействием при этом может быть изменение расхода суспензии. Маточный раствор выводится из аппаратов переливом, поэтому его расход не регулируется. Стабилизация всех этих параметров обеспечивает, как правило, заданные размеры кристаллов.

Контролировать следует расходы поступающего раствора, маточного раствора, суспензии и хладоносителя, их температуру, уровень и температуру в кристаллизаторе. Контролируются и сигнализируются, кроме того, параметры насосов раствора и суспензии.

ГЛАВА 16

УПРАВЛЕНИЕ МАССООБМЕННЫМИ ПРОЦЕССАМИ

16.1. РЕКТИФИКАЦИЯ

В качестве объекта управления при автоматизации процесса ректификации примем установку для разделения бинарной смеси, состоящую из тарельчатой ректификационной колонны, выносного кипятильника, дефлегматора и теплообменника для подогрева исходной смеси (рис. 16.1). Ректификация относится к основным процессам химической технологии. Показателем его эффективности является состав целевого продукта. В зависимости от технологических особенностей целевым продуктом может быть как дистиллят, так и кубовый остаток. Поддержание постоянного состава целевого продукта и является целью управления. В дальнейшем будем считать целевым продуктом дистиллят.

Ректификационная установка представляет собой сложный объект управления со значительным временем запаздывания с большим числом параметров, характеризующих процесс, с многочисленными взаимосвязями между ними и т. д.

В объекте возникают такие возмущения, как изменения начальных параметров исходной смеси, а также тепло- и хладоносителей, изменения свойств теплопередающих поверхностей, что связано с отложением веществ на стенках, и т. д.

Концентрация Q_d искомого компонента в дистилляте — показатель эффективности — зависит самым непосредственным образом от начальных параметров исходной смеси.

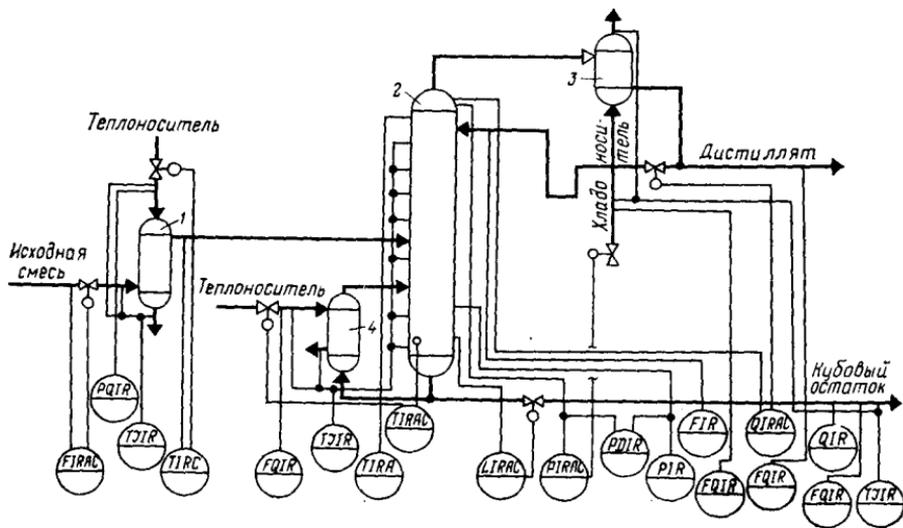


Рис. 16.1. Схема автоматизации процесса ректификации:

1 — теплообменник исходной смеси; 2 — ректификационная колонна; 3 — дефлегматор; 4 — кипятильник

Расход сырья F_c можно стабилизировать, используя регулятор расхода. Диафрагма и исполнительное устройство этого регулятора должны быть установлены до теплообменника.

Рассмотрим возможности регулирования режимных параметров верхней (укрепляющей) части ректификационной колонны, которые непосредственно определяют состав дистиллята.

Зависимость состава паров, выходящих из укрепляющей части колонны (а значит, и состава дистиллята), от других параметров процесса можно проследить по диаграмме (рис. 16.2). Анализ диаграммы показывает, что концентрация Y (показатель эффективности) определяется концентрацией X , температурой кипения t жидкости и давлением паров P над жидкостью. Для получения определенной концентрации, например Y_3 , в соответствии с правилом фаз следует поддерживать на определенном значении только два из перечисленных параметров, например давление P_1 и концентрацию X_3 .

Давление P легко стабилизировать изменением расхода пара из колонны. Исполнительное устройство при этом устанавливают не на шлемовой трубе, соединяющей верхнюю часть ректификационной колонны с дефлегматором, а на линии хладагента, поступающего в дефлегматор.

Стабилизация давления в верхней части колонны необходима не только для поддержания заданного состава целевого продукта, но и для обеспечения нормального гидродинамического режима колонны.

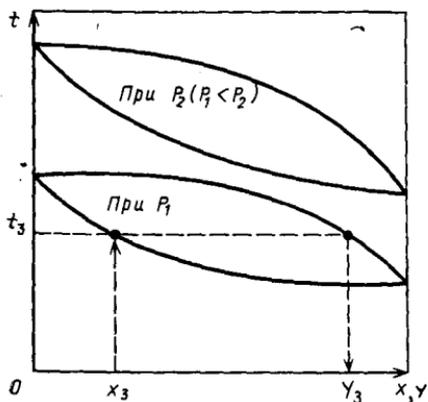


Рис. 16.2. Диаграмма температура (t) — концентрация низкокипящего компонента в жидкости (X) и парах (Y)

Сравнительно просто регулировать также и концентрацию изменением расхода флегмы: чем выше этот расход, тем больше низкокипящего компонента будет в жидкости, и наоборот.

На практике часто регулируют состав паров (а в отдельных случаях и непосредственно состав дистиллята) изменением расхода флегмы. Регулирующий орган во всех случаях может быть установлен как на линии флегмы, так и на линии дистиллята, что равноценно. В качестве анализаторов состава в промышленности используют хроматографы и газоанализаторы.

Итак, для достижения цели управления необходимо стабилизировать давление и состав жидкости в верхней части колонны.

Необходимость стабилизации давления паров в кубе отпадает, так как ректификационная колонна обладает хорошо выраженными свойствами самовыравнивания по этому параметру. Этого нельзя сказать о температуре (составе) жидкости в кубе. Изменение расхода флегмы с целью регулирования второго параметра приводит к изменению параметров в кубе колонны лишь через несколько часов. В связи с этим для поддержания нормального режима в кубе возникает необходимость независимого регулирования одного из этих параметров. Обычно стабилизируют температуру. Итак, в кубе колонны следует регулировать температуру.

Регулирующие воздействия в нижней части колонны можно осуществлять изменением расходов кубового остатка и теплоносителя, подаваемого в кипятильник. Если учесть, что один из них, а именно расход остатка, следует использовать для поддержания материального баланса, то единственным регулирующим воздействием при регулировании температуры является изменение расхода теплоносителя.

Таким образом, если целевым продуктом является дистиллят, то для достижения цели управления следует регулировать расход исходной смеси, температуру исходной смеси, давление в верхней части колонны, состав жидкости в верхней части колонны, температуру и уровень жидкости в кубе*. Контроль под-

* Если в качестве целевого продукта используется кубовый остаток, то в нижней части колонны регулируют состав жидкости изменением расхода теплоносителя, а в верхней — температуру изменением расхода флегмы.

лежат: расход исходной смеси, дистиллята, флегмы, остатка, тепло- и хладоносителей; состав и температура конечных продуктов; температура исходной смеси, тепло- и хладоносителя; уровень в кубе колонны; температура по высоте колонны; давление в верхней и нижней частях колонны, а также перепад этих давлений.

Регулирование параметров на контрольных тарелках. Основными регулирующими воздействиями, при помощи которых компенсируются возмущения и достигается цель управления, является изменение расхода флегмы в верхней части колонны и расхода теплоносителя, подаваемого в кипятильник, — в нижней. От правильности выбора параметров, по значениям которых будут осуществляться изменения этих расходов, во многом зависит достижение цели управления.

График изменения состава по высоте ректификационной колонны при скачкообразном изменении расхода флегмы (рис. 16.3) показывает, что состав конечных продуктов изменяется слабо (кривые 1 и 2 в начальных точках почти совпадают) при значительных изменениях состава (точки A_1 и A_2 , B_1 и B_2) на средних контрольных тарелках укрепляющей и исчерпывающей частей колонны. Здесь и следует устанавливать датчики состава. Заметим, что все сказанное в отношении составов продуктов справедливо и для температур, а также для физико-химических переменных величин продуктов. К таким переменным величинам относятся парциальные давления паров компонентов смеси, плотность продукта, температура кипения и т. д.

Каскадно-связанное регулирование. Ректификационные колонны являются объектами управления с большими запаздываниями, поэтому возмущения успевают существенно изменить режим всей колонны, прежде чем изменится состав целевых продуктов и начнется их компенсация основными регуляторами. Улучшения качества управления процессом можно добиться введением дополнительных контуров регулирования.

Каскадно-связанное регулирование почти всегда применяют при регулировании состава конечных продуктов. В качестве вспомогательного параметра при регулировании состава в верхней части колонны (или на контрольной тарелке) используют расход флегмы.

При регулировании состава кубового остатка вспомогательными параметрами могут быть расход теплоносителя (либо его давление, если в ка-

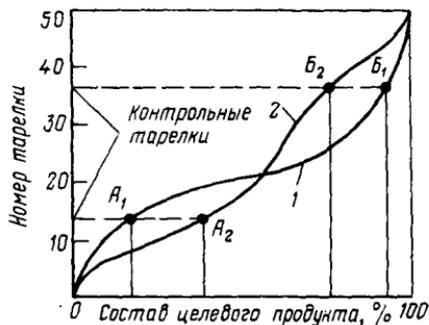


Рис. 16.3. График изменения состава целевого продукта по высоте колонны до изменения расхода флегмы (1) и после его изменения (2)

честве теплоносителя используют пар) или температура в нижней части колонны, или же оба параметра.

Когда расход исходной смеси определяется предыдущим технологическим процессом и сильно изменяется во времени, большой эффект могут дать регуляторы соотношения расходов исходной смеси и флегмы (или исходной смеси и теплоносителя, подаваемого в кипятильник) с коррекцией по составу дистиллята (или остатка).

Регулирование при использовании экстремальных регуляторов и вычислительных машин. При управлении процессом ректификации решаются такие задачи, как получение продуктов максимально возможной чистоты, достижение максимальной производительности колонны, получение минимальной себестоимости целевого продукта и т. п., что требует применения экстремальных регуляторов или управляющих вычислительных машин.

Экстремальный регулятор, например, позволяет изменять расход флегмы для получения максимально возможной чистоты дистиллята. На работу такого регулятора накладываются ограничения по расходу флегмы.

Ректификация является одним из самых сложных процессов химической технологии, поэтому большой эффект может дать применение управляющих машин, на которые возлагаются следующие функции: вычисление оптимальной нагрузки колонны и установление задания регулятору расхода смеси; вычисление оптимальных соотношений расходов смеси и флегмы, смеси и теплоносителя и установление задания регуляторам расхода флегмы и теплоносителя; корректировка вычисленных соотношений расходов по составу целевого продукта; вычисление номера оптимальной тарелки питания и переключение устройств ввода питания на эту тарелку; вычисление оптимального значения энтальпий исходной смеси и установление задания регулятору расхода теплоносителя, подаваемого в теплообменник для нагревания смеси; переход от одного алгоритма управления к другому при изменении цели управления, при переходе с пускового режима на нормальный и с нормального режима на останов (алгоритм машины включает ограничения, например, по качеству целевых продуктов) и т. д.

16.2. АБСОРБЦИЯ

В качестве объекта управления процессом абсорбции примем абсорбционную установку, состоящую из абсорбционной колонны и двух холодильников — на линиях абсорбента и газовой смеси (рис. 16.4). Показателем эффективности процесса является концентрация Y_k извлекаемого компонента в обедненной смеси, а целью управления — достижение определенного значения этой концентрации.

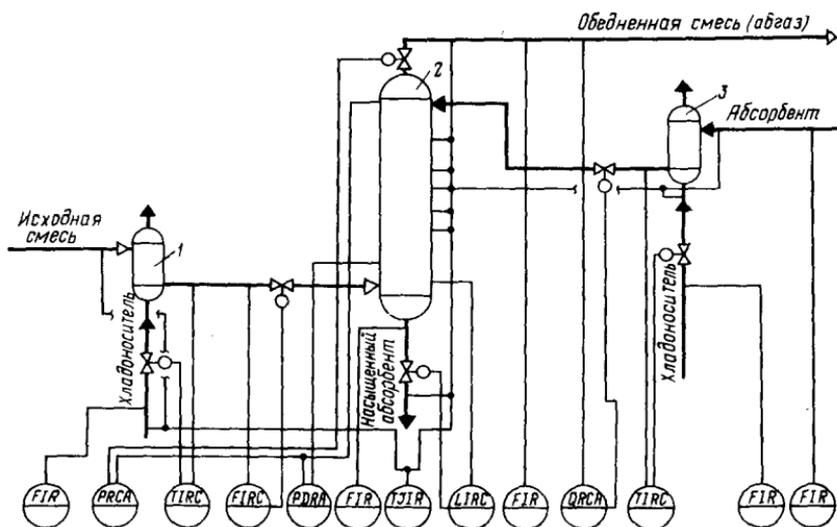


Рис. 16.4. Схема автоматизации процесса абсорбции:

1, 3 — холодильники; 2 — абсорбционная колонна

Концентрация Y_k определяется разностью количеств извлекаемого компонента, поступающего с газовой смесью и поглощаемого из нее абсорбентом. Количество компонента, поступающего в колонну, однозначно определяется расходом газовой смеси F_c и начальной концентрацией в ней извлекаемого компонента Y_n . Количество же компонента, который переходит из газовой фазы в жидкую, в основном зависит от движущихся сил на входе в аппарат Δ_1 и на выходе из аппарата Δ_2 , т. е. от положения рабочей и равновесной линий процесса (рис. 16.5). Положение равновесной линии определяется температурой и давлением процесса (рис. 16.6), а положение рабочей линии — начальной и конечной концентрациями компонента в обеих фазах. Если цель управления достигнута, концентрация Y_k будет постоянной; в жидкой фазе (X_k) она определяется удельным расходом жидкости F_a/F_c (где F_a — расход абсорбента).

Таким образом, концентрация Y_k зависит от расхода газовой смеси, концентраций X_n и Y_n , отношения расходов F_a/F_c , температуры и давления в аппарате.

Изменения расхода газовой смеси могут быть сильными возмущениями, поэтому расход газа следует стабилизировать.

Концентрации X_n и Y_n определяются режимами других технологических процессов; с их изменением в объект будут вноситься возмущающие воздействия. Отношение расходов F_a/F_c можно поддерживать постоянным, стабилизируя оба расхода.

Температура в абсорбере зависит от многих параметров: температуры, теплоемкости и расхода газовой и жидкой фаз.

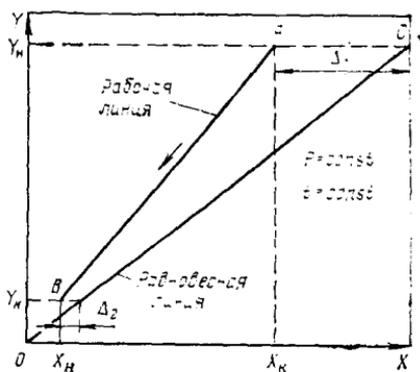


Рис. 16.5. Диаграмма X—Y:
X и Y — содержание поглощаемого компонента
в жидкости и газе

интенсивности массообмена между фазами, потерь тепла в окружающую среду.

В рассматриваемом абсорбере нет внутреннего охлаждения, поэтому ограничиваются стабилизацией температур абсорбента t_a и газовой смеси t_c на входе в абсорбер, достигаемой изменением расходов хладоносителей. Давление в абсорбере целесообразно стабилизировать изменением расхода обедненной смеси.

Итак, стабилизировать все параметры, влияющие на показатель эффективности, практически невозможно. Поэтому в качестве регулируемой величины следует взять концентрацию Y_k , а регулирующие воздействия реализовать изменением отношения расходов F_a/F_c . Для улучшения качества регулирования показателя эффективности надо предусмотреть узлы регулирования расхода F_c , температур t_a и t_c , давления в колонне. В нижней части абсорбера должно находиться некоторое количество жидкости, обеспечивающее гидравлический затвор, что исключает поступление газовой смеси из абсорбера в линию насыщенного абсорбента и позволяет регулировать давление в абсорбере. Постоянное количество этой жидкости поддерживается регулированием уровня в абсорбере, обеспечиваемым изменением расхода насыщенного абсорбента.

Регулирование состава при переменном расходе газовой смеси. Если расход газовой смеси определяется технологическим режимом предшествующего процесса, то стабилизировать его нельзя, а изменения его являются для абсорбера сильными возмущениями. Для качественного регулирования процесса эти возмущения следует компенсировать до распространения их в объекте. Эту задачу решает регулятор соотношения расходов газовой смеси и абсорбента с коррекцией по концентрации Y_k .

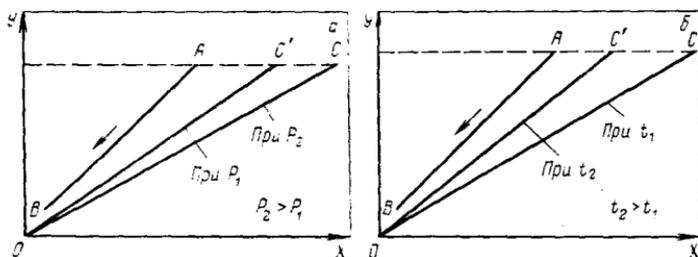
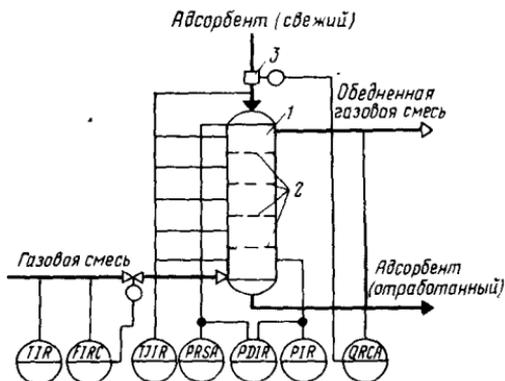


Рис. 16.6. Влияние давления (а) и температуры (б) на процесс абсорбции:
X и Y — содержание поглощаемого компонента в жидкости и газе

Рис. 16.7. Схема автоматизации процесса адсорбции

Регулирование по возмущению. Если в объект поступают возмущения в виде изменения состава и расхода исходной смеси, то расход абсорбента целесообразно изменять в зависимости от этих параметров, т. е. использовать регулирование по возмущению.

Используя многоконтурные системы, можно значительно улучшить качество регулирования процесса и при наличии других возмущений. В качестве вспомогательных параметров выбирают расход абсорбента — при регулировании концентрации извлекаемого компонента в обедненной смеси; расход хладонносителя — при регулировании температур газовой смеси и абсорбента, выводимых из холодильников; расход насыщенного абсорбента — при регулировании уровня.



16.3. АДСОРБЦИЯ

В качестве объекта управления возьмем противоточный непрерывнодействующий аппарат 1 с кипящим слоем мелкозернистого абсорбента на тарелках 2 (рис. 16.7). На верхнюю тарелку такого аппарата подается абсорбент дозатором 3. Под действием силы тяжести абсорбент проваливается с тарелки на тарелку и выводится из нижней части адсорбера; газ же движется снизу вверх и выводится из верхней части аппарата. Показатель эффективности, цель управления и закономерности такого процесса адсорбции аналогичны процессу абсорбции, поэтому решения по автоматизации этих процессов одни и те же.

16.4. СУШКА

В качестве объекта управления при автоматизации процесса сушки возьмем барабанную прямоточную сушилку, в которой сушильным агентом служат дымовые газы, получаемые в топке (рис. 16.8). Показателем эффективности данного процесса является влажность ω_k материала, выходящего из сушилки, а целью управления — поддержание этого параметра на определенном уровне.

Расход материала определяется производительностью сушилки, которая, как правило, должна быть постоянной. Поэтому следует идти по пути стабилизации расхода влажного материала, что обеспечивает заданную производительность и устраняет

возмущения по данному каналу. Для этой цели устанавливают автоматические дозаторы.

Влажность ω_n зависит от технологического режима предыдущих процессов. С изменением этого параметра в объекте возникают сильные возмущающие воздействия.

Количество влаги W , которое поглощается сушильным агентом, определяется в основном поверхностью G контакта сушильного агента и материала, а также средней движущей силой $\bar{\Delta}$. Поверхность G зависит от толщины слоя материала и его гранулометрического состава. Толщина слоя определяется наличием материала в барабане и при постоянных расходе материала и скорости вращения барабана (в практике для вращения используют асинхронные двигатели с постоянным числом оборотов рабочего вала) будет постоянна. Гранулометрический состав зависит от хода предыдущих технологических процессов; с его изменением в объект вносятся возмущения.

Средняя движущая сила $\bar{\Delta}$ определяется движущими силами в начале Δ_1 и в конце Δ_2 процесса (рис. 16.9). Положение точки A зависит от значений влажности материала ω_n и сушильного агента φ_n , которые определяются предшествующими процессами. Стабилизировать их сложно; по этим каналам будут поступать возмущения.

Положение точки B определяется значениями влажности материала ω_k (ω_k задается, исходя из цели управления) и сушильного агента φ_k . Величина влажности φ_k зависит от расхода сушильного агента, проходящего через сушилку; чем он больше, тем меньше φ_k и тем левее располагается точка B на линии

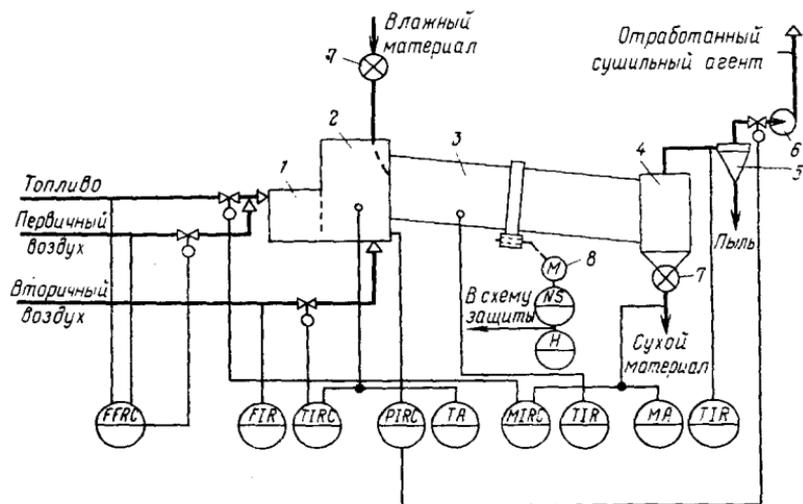


Рис. 16.8. Схема автоматизации процесса сушки:

1 — точка; 2 — смешивательная камера; 3 — барабан; 4 — бункер; 5 — циклон; 6 — вентилятор; 7 — автоматический дозатор; 8 — электродвигатель барабана

Рис. 16.9. Диаграмма ω — φ :

OB — кривая равновесной влажности: ω_n , ω_k — влажность материала на входе в сушилку и выходе из нее; φ_n , φ_k — влажность сушильного агента на входе в сушилку и выходе из нее

влажности ω_k . С изменением расхода сушильного агента в объект могут вноситься действенные регулирующие воздействия.

Положение точек Γ и D определяется положением кривой равновесной влажности. Положение этой кривой зависит от температуры и разрежения в барабане сушилки. Разрежение легко стабилизируется изменением расхода сушильного агента, выводимого из сушилки. Температура же определяется всеми начальными параметрами, а также интенсивностью процесса испарения влаги из материала. Стабилизировать ее можно, в частности, изменением расхода или температуры сушильного агента. Необходимо отметить, что интервал изменения последнего параметра существенно ограничен, что объясняется требованиями техники безопасности и возможностью разложения высушиваемого материала.

Таким образом, все параметры, влияющие на показатель эффективности, стабилизировать невозможно.

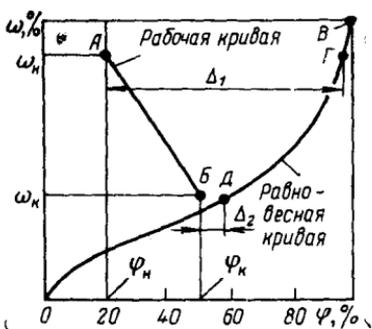
Поэтому в качестве основного регулируемого параметра целесообразно взять влажность ω_k , а регулирующее воздействие осуществлять изменением расхода сушильного агента. Соответствие между расходами топлива и воздуха обеспечивается регулятором соотношения. Необходимо регулировать также расход влажного материала и разрежение в сушилке изменением расхода отобранного сушильного агента.

При управлении процессом сушки следует контролировать расход топлива, первичного и вторичного воздуха, влажного и сухого материала, температуру сушильного агента на входе в сушилку и на выходе из нее, температуру в сушилке, разрежение в смесительной камере.

Регулирование ленточных и конвейерных сушилок. Регулирование этих аппаратов (рис. 16.10) подобно регулированию барабанных сушилок. Стабилизации подлежат влажность сухого материала или конечная температура сушильного агента, температура сушильного агента на входе в сушилку, разрежение в сушилке.

Конструкции ленточных и конвейерных сушилок позволяют принимать и особые решения по их автоматизации. При использовании ленточного транспортера (конвейера) появляется возможность регулирования влажности ω_k изменением скорости транспортера.

Регулирование струйных распылительных сушилок. В сушилках этого типа осуществляется сушка суспензии различных не-



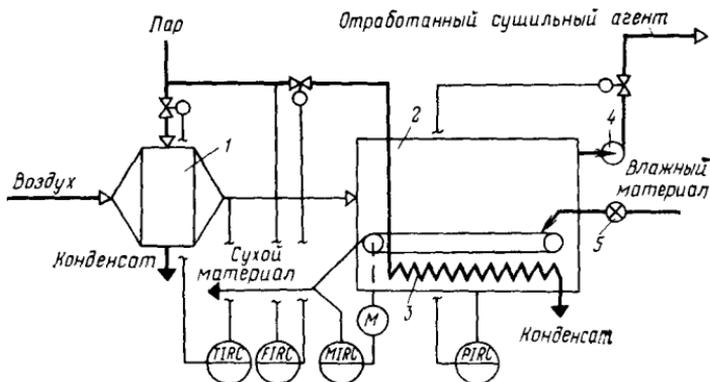


Рис. 16.10. Схема регулирования ленточной (конвейерной) сушилки:

1 — калорифер; 2 — сушилка; 3 — дополнительный подогреватель; 4 — вентилятор; 5 — питатель

органических соединений (предварительно нагретых в теплообменнике) при распыливании их сушильным агентом. В струйных и других распылительных сушилках, как правило, требуется получить продукт не только заданной влажности, но и постоянного гранулометрического состава.

Поэтому к уже известным решениям по автоматизации добавляется, в частности, узел регулирования размеров частиц изменением соотношения расхода суспензии и суммарного расхода воздуха, поступающего в топку.

При автоматизации струйных сушилок в качестве основной регулируемой величины часто используют не влажность w_k , а температуру или влажность обработанного сушильного агента.

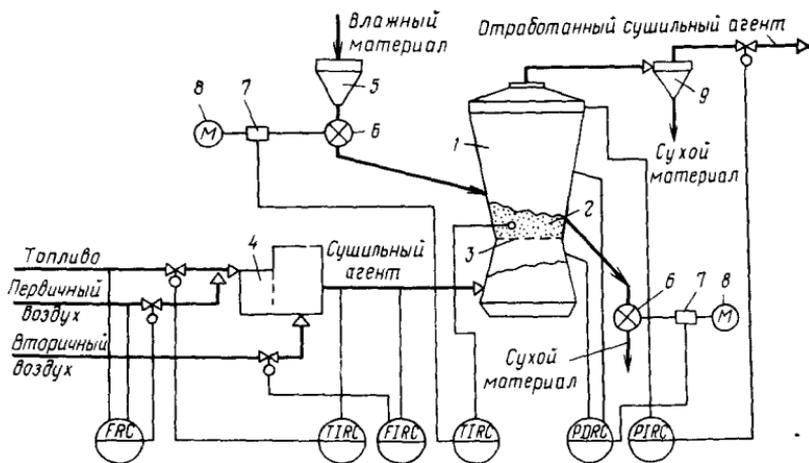


Рис. 16.11. Схема регулирования процесса в сушилках с кипящим слоем:

1 — сушилка; 2 — кипящий слой; 3 — решетка; 4 — топка; 5 — промежуточный бункер; 6 — питатели; 7 — вариаторы; 8 — электродвигатели; 9 — циклон

Регулирование сушилок кипящего слоя (КС). При автоматизации сушки в кипящем слое основным показателем процесса является температура в слое. Регулирующие воздействия при стабилизации температур могут осуществляться изменением расхода влажного материала или сушильного агента, а также изменением температуры последнего. Более предпочтительен первый вариант (рис. 16.11), так как параметры сушильного агента можно изменять только в определенном довольно узком интервале. Первый способ предполагает наличие между сушилкой и аппаратом предыдущего технологического процесса промежуточного бункера с определенным запасом материала.

Нормальная работа сушилок КС возможна только при определенной высоте кипящего слоя. Для поддержания заданного значения этого параметра стабилизируется гидродинамическое сопротивление слоя.

Кроме этих регуляторов предусматриваются стандартные узлы регулирования разрежения, начальной температуры сушильного агента, его расхода, соотношения расходов топлива и первичного воздуха.

Оптимизация процесса сушки при помощи вычислительной техники. Оптимизирующие управляющие системы целесообразно применять в сушилках с высокоэффективными способами сушки, например с сушкой в кипящем слое. В сушилках с большой инерционностью поиск экстремальных значений затягивается, а качество регулирования не улучшается по сравнению с регулированием по обычным схемам.

Критерием оптимальности сушки служит, как правило, количество влаги W , удаляемой из материала в единицу времени.

$$W = F_c (\omega_n - \omega_k).$$

Текущие значения расхода сухого материала F_c и влажностей ω_n и ω_k подаются на вычислительное устройство, рассчитывающее критерий оптимальности. Выходной сигнал с этого устройства поступает на экстремальный регулятор, который изменяет поочередно расходы сушильного агента и влажного материала, отыскивая оптимальные значения критерия. При работе экстремального регулятора вводится ограничение по минимальной влажности.

УПРАВЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

17.1. ПЕРЕМЕЩЕНИЕ ТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ

В качестве объекта управления процессом перемещения твердых материалов примем ленточный транспортер, перемещающий сыпучий материал (рис. 17.1). Показателем эффективности этого процесса является расход транспортируемого материала, а целью управления будем считать поддержание заданного значения расхода. Поскольку все возмущения на входе в объект (изменение гранулометрического состава материала, его влажности и насыпной массы, проскальзывание ленты транспортера и т. п.) устранить невозможно, расход материала следует принять в качестве регулируемой величины и регулировать его корректировкой работы дозирующих устройств (см. п. 17.2).

Контролю подлежат расход перемещаемого материала и количество потребляемой приводом электроэнергии.

Необходимо заметить, что типовые решения автоматизации ленточного транспортера при перемещении штучных грузов аналогичны, но в качестве регулируемой величины в этом случае следует принять число единиц груза в единицу времени, а регулирующее воздействие осуществлять корректировкой работы погрузочных устройств.

Автоматизация процессов распределения грузов. Поточно-транспортная система (П.Т.С.) современных химических предприятий, как правило, очень сложна вследствие большого числа отправителей и получателей грузов, имеющих определенные адресные связи. Автоматизация операций нанесения адресов, считывания их, выдачи сигналов на разгрузочное устройство, снятия адреса и переадресования требует применения специальных автоматических устройств.

Автоматизация операций регистрации и анализа параметров ПТС. Для централизованного автоматического контроля и регистрации числа переданных и хранящихся на различных ста-

ндиях производства единиц сырья, полуфабрикатов и готовой продукции используются машины централизованного контроля («Марс», «Зенит», «Румб»).

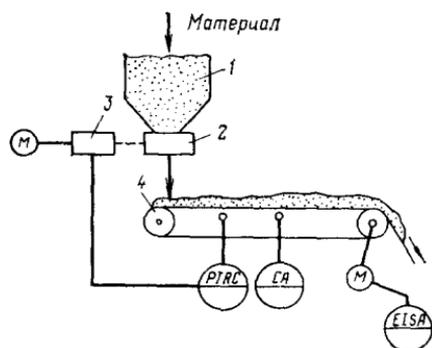


Рис. 17.1. Схема автоматизации процесса перемещения сыпучих материалов:

1 - бункер; 2 - дозатор; 3 - вариатор; 4 - ленточный транспортер; С - наличие материала на ленте

Рис. 17.2. Схема автоматизации процесса дозирования:

1 — бункер; 2 — заслонка; 3 — транспортер; 4 — вариатор

17.2. ДОЗИРОВАНИЕ ТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ

В качестве объекта управления прием дозатор непрерывного действия с ленточным питателем (рис. 17.2). Показателем эффективности процесса дозирования является расход дозируемого материала, а целью управления — поддержание определенного значения этого расхода.

Массовый расход материала через ленточный питатель зависит от площади S проходного отверстия, скорости v движения и насыпной плотности ρ' материала.

Площадь S , равная произведению ширины ленты b (величина постоянная) на высоту открытия заслонки h , периодически сокращается при прохождении частиц материала у кромки элементов, ограничивающих проходное сечение. Приняв, что частицы (куски) материала имеют шаровую форму с эквивалентным диаметром $d_{\text{экв}}$, получили уравнение, которое позволяет рассчитать поправку h' к высоте открытия h , учитывающую уменьшение площади S

$$h' = (d_{\text{экв}}/8) (1 + 3\pi/4) \approx d_{\text{экв}} 2,3. \quad (17.1)$$

Таким образом, площадь S определяется по уравнению

$$S = b(h - d_{\text{экв}}/2,3), \quad (17.2)$$

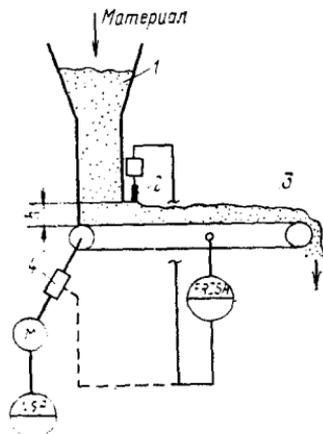
и зависит от высоты открытия заслонки h и диаметра частиц $d_{\text{экв}}$.

Возмущения могут поступать в объект с изменением размеров частиц насыпной плотности ρ' .

Таким образом, в объект будут поступать возмущения, для компенсации которых следует оказывать регулирующие воздействия изменением степени открытия заслонки или скорости перемещения материала. Регулируемой величиной будет служить расход дозируемого материала.

Контролировать следует расход материала и его количество, а сигнализировать — значительные отклонения расхода от заданного значения и состояния привода дозатора («Включен», «Выключен»). В случае полного прекращения поступления материала на ленту транспортера устройства защиты должны автоматически прекратить работу дозатора и других механизмов.

Способы внесения регулирующих воздействий при использовании питателей различных типов. Большое разнообразие дозируемых материалов привело к созданию питателей различных типов (рис. 17.3). Рассмотрим их характеристики для выявления возможных регулирующих воздействий.



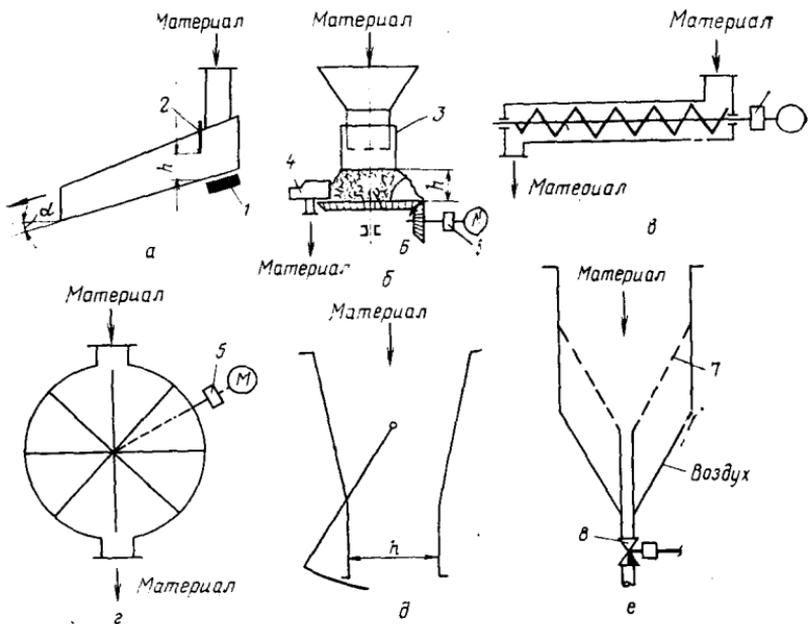


Рис. 17.3. Питатели:

a — вибрационный; *б* — тарельчатый; *в* — шнековый; *г* — секторный; *д* — гравитационный; *е* — аэрационный; 1 — вибратор; 2 — автоматическая заслонка; 3 — манжета; 4 — нож; 5 — вариатор; 6 — тарелка; 7 — пористая перегородка; 8 — шиловый клапан

Вибропитатель применяют для дозирования различных материалов.

Регулировать производительность можно изменением амплитуды и частоты колебаний питателя, угла наклона лотка и степени открытия заслонки.

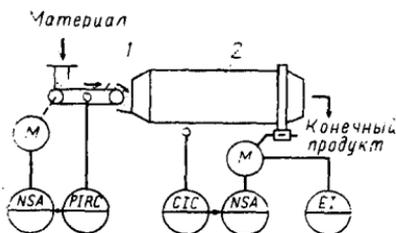
Тарельчатый питатель предназначен для дозирования мелкозернистых и мелкокусковых материалов. Регулировать производительность тарельчатого питателя можно изменением частоты вращения (числа оборотов) или высоты щели h . Наибольший интерес представляет второй метод. Высоту щели h изменяют перемещением манжеты 3. Однако таким образом можно добиться только грубого регулирования. Более точное регулирование достигается изменением положения ножа 4, в результате которого изменяется толщина срезаемого слоя материала.

Установив регулируемый электропривод или вариатор 5 с реверсивным двигателем, можно регулировать расход F изменением числа оборотов n .

Шнековый питатель применяют для выдачи порошкооб-

Рис. 17.4. Схема автоматизации процессов измельчения:

1 — ленточный питатель; 2 — барабан; С — амплитуда шума



разных и мелкозернистых материалов. Единственным регулирующим воздействием является изменение числа оборотов n . Для этого устанавливают регулируемые электроприводы или вариаторы с реверсивным двигателем.

Секторный питатель используют для дозирования порошкообразных и мелкозернистых материалов.

Регулирующие воздействия могут вноситься изменением числа оборотов вала питателя и емкости сектора.

Гравитационный питатель. Расход дозируемого материала зависит в питателе этого типа от длины отверстия h , которую можно изменять автоматической заслонкой.

Аэропитатель нашел применение для дозирования пылевидных материалов. Изменение расхода дозируемого материала легко осуществляется стандартными регулирующими органами. Для поддержания нормального режима псевдооживления целесообразно регулировать давление воздуха.

17.3. ИЗМЕЛЬЧЕНИЕ ТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ

В качестве объекта управления при автоматизации процесса измельчения примем барабанную мельницу сухого помола (рис. 17.4). Показателем эффективности при управлении данным процессом является размер кусков измельченного материала (тонина помола), а целью управления — поддержание определенного конечного гранулометрического состава материала.

Масса материала W в барабане будет определяться расходом сырья и конечного продукта. Ее можно стабилизировать изменением одного из этих расходов.

В промышленности нет качественных, непрерывнодействующих датчиков размеров твердых частиц, поэтому стабилизируют количество материала в барабане.

Масса материала W не поддается непосредственному измерению. На практике эта регулируемая величина определяется косвенными методами: по силе тока электродвигателя мельницы, по вибрации барабана или опоры мельницы, по амплитуде шума, создаваемого мельницей. Наибольшее распространение нашел последний метод.

Контролю в данном процессе подлежат расход материала; амплитуда шума, создаваемого мельницей; количество потребляемой энергии.

Регулирование барабанных мельниц мокрого помола. Автоматизировать эти машины сложнее, чем мельницы сухого помола, что обусловлено наличием дополнительного жидкостного потока. Расход воды, подаваемой в мельницу, следует стабилизировать или изменять в зависимости от количества материала в мельнице. В качестве регулируемой величины можно выбрать плотность суспензии, которая довольно точно характеризует тонину помола.

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

ГЛАВА 18

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ВНЕДРЕНИЯ АСУ**18.1. НЕОБХОДИМОСТЬ ВНЕДРЕНИЯ НОВЫХ МЕТОДОВ
И СРЕДСТВ УПРАВЛЕНИЯ**

Использование вычислительной техники в народном хозяйстве идет по пути создания *автоматизированных систем управления (АСУ)*.

АСУ — система человек — машина, обеспечивающая эффективное функционирование объекта, в которой сбор и переработка информации, необходимой для реализации функций управления, осуществляется с применением средств автоматизации и вычислительной техники.

Из определения следует, что человек — специалист в той или иной области, например технолог, остается в системе управления при автоматизации его функций при помощи вычислительной техники. На него возлагается наиболее сложная операция управления — принятие решения по изменению режимов работы объекта управления на основе данных, предоставляемых ему ЭВМ и поступающих по другим каналам. ЭВМ же осуществляет сбор и передачу информации, контроль за ее достоверностью, анализ информации по определенным алгоритмам, подготовку управленческого решения. Такой синтез позволяет сочетать интеллект человека, мощный математический аппарат* и большие возможности вычислительной техники. Это дает возможность мобилизовать резервы в производственно-хозяйственной деятельности объектов, которые вследствие недостатков существующего аппарата управления остаются неиспользованными, и повысить эффективность функционирования объекта управления любого уровня: установки, цеха, предприятия, отрасли и, наконец, всего народного хозяйства в целом при использовании ВТ.

* Теоретической основой автоматизации на основе вычислительной техники является кибернетика — наука об общих законах получения, хранения, передачи и преобразования информации в сложных управляющих системах. Задача автоматизации современных технических систем и комплексов настолько сложна и специфична, что совокупность научных направлений, обеспечивающих ее решение, выделена в отдельную область науки и носит название технической кибернетики.

18.2. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ АСУ

Создание, внедрение и функционирование АСУ — чрезвычайно сложная задача, что обусловлено следующими причинами.

Во-первых, нет достаточного опыта по созданию таких систем.

Во-вторых, при создании и внедрении АСУ нельзя воспользоваться обычной схемой внедрения новой техники. При внедрении АСУ возможность проверки правильности проектных технических решений появляется лишь на действующем объекте управления после проведения трудоемких и продолжительных работ по составлению рабочих программ.

В-третьих, все объекты управления с течением времени претерпевают существенные изменения, что влечет за собой модернизацию ранее внедренных задач.

Чтобы при наличии всех перечисленных трудностей внедрение дорогостоящих АСУ было эффективно, необходимо соблюдение общих принципов построения АСУ. Рассмотрим их.

Одним из важнейших является *принцип новых задач*, которым необходимо руководствоваться при внедрении АСУ. Он заключается в том, что нельзя просто перекладывать на вычислительную технику традиционно сложившиеся функции управления; их необходимо перестраивать с учетом неограниченных возможностей ЭВМ к запоминанию, счету, поиску оптимальных решений. Поэтому одним из этапов внедрения АСУ является тщательный анализ объекта управления для выявления его неиспользованных резервов.

Этот принцип предполагает разработку грамотной технологии управления объектом.

Другим общим принципом является *системный подход*. Любая система, в том числе и АСУ, состоит из элементов. В то же время — это связанное целое. Естественно, что все элементы взаимосвязаны и взаимозависимы. При разработке и функционировании сложной системы необходимо увязать в единое целое огромное количество элементов.

Для успешного решения этой проблемы необходимо использовать системный подход, который предполагает рассмотрение всех элементов системы во взаимосвязи, определение цели функционирования системы и каждого элемента в отдельности.

Важным является и *принцип непрерывного развития системы*, так как процесс совершенствования объекта управления и системы управления неисчерпаем. Особенно этому подвержены методы и формы управления, вычислительная техника, технология обработки информации. Поэтому каждая создаваемая АСУ должна иметь какие-то резервы (по быстродействию и емкости памяти) для последующего развития. С этим принципом тесно связан принцип *системной адаптации*. Адаптация — способность системы целенаправленно приспособлять свое поведение под изменяющиеся внешние и внутренние условия.

Из этого следует, что для повышения жизнеспособности АСУ должна быть гибкой, иметь возможность перестраивать режимы работы, структуру, функции в зависимости от сложившейся на производстве ситуации.

Еще один принцип, которого необходимо придерживаться при создании АСУ, — это *принцип первого руководителя*. Соблюдение его предопределяет высокий уровень АСУ, а значит и ее эффективность. В соответствии с этим принципом разработка, внедрение и функционирование АСУ должны проводиться под непосредственным руководством первого руководителя (директора, начальника производства, цеха). Всякая попытка передоверить дела АСУ второстепенным лицам неизбежно приводит к автоматизации рутинных задач. Нельзя забывать и о том, что при использовании ЭВМ существенно изменяются функции и методы управления, происходит перераспределение обязанностей управленческого персонала. А это — вопросы, которые успешно может решить только первый руководитель.

18.3. ВИДЫ АСУ

В нашей стране принята развернутая программа работ по совершенствованию управления в народном хозяйстве, включая создание АСУ различного назначения. Основным пунктом этой программы является разработка Общегосударственной автоматизированной системы сбора и обработки информации для целей учета, планирования и управления (ОГАС).

ОГАС включает в себя государственные автоматизированные системы управления плановых расчетов (АСПР), а также АСУ для управления отдельными отраслями (ОАСУ). Для управления промышленными предприятиями и производственными объединениями создаются АСУПы.

Объектами управления всех вышеприведенных систем являются экономические системы.

Для управления технологическими процессами, в которых объект управления принципиально другой (техническая система), служат АСУТП. В связи с тем, что управление технологическими процессами неразрывно связано с управлением предприятием, начинают находить применение интегрированные автоматизированные системы управления ИАСУ, в которых автоматизируются функции как предприятия, так и технологических процессов, как единой действующей системы.

18.4. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ АСУ

Внедрение вычислительной техники (ВТ) и современных экономико-математических методов для управления технологическими процессами и предприятиями приводит к оптимизации технологических режимов установок, планирования производства и использования ресурсов производства, получению более

полной и своевременной информации об объекте управления, снижению и ликвидации потерь рабочего времени, материалов и энергии, уменьшению простоев оборудования, повышению ритмичности производства и т. д.

К существенному повышению эффективности производства и управления им ведут и те мероприятия, которые проводятся при внедрении АСУ, например совершенствование систем контроля за технологическими процессами, рационализация нормативного хозяйства, производственных и функциональных структур предприятий.

Основным показателем экономической эффективности внедрения АСУ является коэффициент экономической эффективности капитальных затрат на АСУ, который рассчитывают по формуле

$$E = P/K = (Ц - С)/K, \quad (18.1)$$

где K — капитальные затраты на АСУ; P — годовая прибыль, обеспечиваемая этими капитальными затратами; $Ц$ — стоимость (в оптовых ценах) годового выпуска продукции; $С$ — себестоимость годового выпуска продукции.

Если внедрение ВТ происходит на уже действующем объекте управления, то формула имеет вид

$$E = (P_2 - P_1)/K = [(Ц_2 - С_2) - (Ц_1 - С_1)]/K, \quad (18.2)$$

где P_1 и P_2 , $Ц_1$ и $Ц_2$, $С_1$ и $С_2$ — годовая прибыль, стоимость и себестоимость годового выпуска продукции соответственно до и после внедрения ВТ.

Как видно из приведенных формул, увеличения коэффициента E можно добиться как за счет уменьшения капитальных затрат, так и в результате увеличения прибыли.

Внедрение ВТ считается целесообразным, если значение коэффициента E больше или равно нормативному, т. е. $E \geq E_n$ (для вычислительной техники $E_n = 0,33$). С коэффициентом E однозначно связан еще один показатель экономической эффективности внедрения АСУ — срок окупаемости T

$$T = 1/E = K/P.$$

Нетрудно подсчитать, что срок окупаемости внедрения ВТ должен быть менее трех лет.

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ (АСУТП)

19.1. НАЗНАЧЕНИЕ И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ АСУТП

АСУТП предназначены для выработки и реализации управляющих воздействий на технологический объект управления (ТОУ) в соответствии с принятым критерием управления при помощи современных средств сбора и переработки информации. Под ТОУ здесь понимают совокупность технологического оборудования и реализованного на нем по соответствующим технологическим регламентам технологического процесса. К ТОУ относятся как технологические агрегаты и установки, реализующие локальный технологический процесс, так и отдельные производства (цехи, участки) промышленного предприятия, если управление этим производством носит технологический характер.

Независимо от того выступает ли в качестве ТОУ локальная технологическая установка или же целый производственный комплекс, он должен удовлетворять ряду требований. Так, его технологическое оборудование должно безотказно работать в установленный межремонтный период, все основные и вспомогательные процессы должны быть механизированы, должна быть обеспечена возможность изменения материальных и энергетических потоков, а также характеристик оборудования в зависимости от внешних условий, должен быть обеспечен доступ человека к местам установки датчиков, исполнительных механизмов и других автоматических устройств. Только в этом случае современные средства сбора и обработки информации могут повысить эффективность ТОУ.

Одним из основных показателей, характеризующих эффективность работы ТОУ, является критерий управления — показатель, характеризующий качество работы ТОУ в целом и принимающий числовые значения в зависимости от вносимых управляющих воздействий.

Наиболее распространенным критерием управления в АСУТП является выход целевого продукта.

Часто критерием управления мощных производственных комплексов берется прибыль или себестоимость продукции.

Совокупность совместно функционирующих АСУТП и ТОУ называется *автоматизированным технологическим комплексом (АТК)*.

Чувствительные элементы, которые представляют собой многочисленные датчики технологических параметров, а также датчики состояния оборудования служат для получения информации о текущем состоянии объекта. Часть сигналов, получае-

мых от датчиков, поступает непосредственно на средства отображения информации, а также через устройство связи с объектом (УСО) на ЭВМ. Большая же часть чувствительных элементов в химической и нефтехимической промышленности относится к устройствам, выдающим унифицированный пневматический сигнал. Этот сигнал может быть воспринят пневматическими контролирующими приборами, а к ЭВМ его можно подключить только через пневмо-электронные преобразователи, стандартный выход которых может быть воспринят УСО ЭВМ.

На щитах и пультах управления операторной устанавливаются многочисленные средства отображения информации: мнемосхему со световой аварийной и технологической сигнализацией, звуковые сигнализаторы, индикаторы, алфавитно-цифровые печатающие устройства (АЦПУ), дисплеи (видеотерминальные устройства), регистрирующие вторичные приборы. Кроме того, в операторной находятся средства регулирования, программно-логического управления, защиты и блокировки.

Как же осуществляется управление технологическим процессом при помощи АСУТП?

Устройства регулирования и управления автоматически ведут процесс. Оперативный технологический персонал ТОУ (операторы, начальники установки) получает текущую оперативную информацию непосредственно от чувствительных элементов через регистрирующие приборы и, кроме того, развернутую обработанную информацию от информационной подсистемы АСУТП и анализируют ход технологического процесса. В этом ему помогает управляющая подсистема АСУТП, которая, исходя из заданного критерия управления, выясняет — достигается ли цель управления.

Если цель не достигается, то управляющая подсистема определяет, как необходимо изменить технологический режим, т. е. каковы должны быть управляющие воздействия. В зависимости от режимов работы АСУТП рассчитанные значения могут реализовываться в виде рекомендаций оператору, в результате изменения установок регуляторам, непосредственно через исполнительные механизмы.

Связь данной АСУТП с другими АСУ (АСУТП следующих и предыдущих по ходу обрабатываемого сырья технологических процессов, АСУ предприятия) осуществляется через специальные устройства связи.

19.2. ОСНОВНЫЕ ФУНКЦИИ АСУТП

Цель, поставленная перед АТК, достигается в результате выполнения системой управления ряда функций. По назначению они объединены в подсистемы.

Информационная подсистема. Она предназначена для представления технологическому персоналу достоверной, обработанной соответствующим образом информации о настоящем, буду-

шем и прошлом ТОУ. Она выполняет следующие функции.

Сбор и первичная переработка информации, в процессе которой решаются приведенные ниже задачи.

Опрос чувствительных элементов с заданной частотой. Частота опроса определяется особенностями ТОУ (его инерционностью, взрыво- и пожароопасностью) и ресурсами ЭВМ; она может колебаться от нескольких секунд до часа.

Фильтрация и прогнозирование технологических параметров. Эти операции состоят в получении наиболее правдоподобных настоящих и будущих (прогнозируемых) значений параметров по результатам измерений.

Усреднение параметров за заданные промежутки времени (час, смену, сутки). Эта операция решается путем накопления суммы $\sum x_i$ и последующего деления на длительность интервала измерения или число циклов измерения n при равных промежутках Δt между циклами

$$\bar{x} = (1/n) \sum_{i=1}^n x_i. \quad (19.1)$$

Расчет действительных значений параметров по информации от чувствительных элементов с учетом их характеристик и введением поправок на состояние контролируемых сред. Например, при определении расхода F по перепаду давления на сужающем устройстве по формуле (19.2) вычислительная техника может учесть изменение во времени коэффициента k , рассчитать (по температуре среды) действительное значение плотности ρ , а в результате с большей точностью определить расход F

$$F = kS \sqrt{\Delta P / \rho}, \quad (19.2)$$

где k — условно постоянный коэффициент; S — площадь поперечного сечения сужающего устройства; ΔP — перепад давлений на сужающем устройстве; ρ — плотность среды.

Интегрирование параметров — вычисление суммарного количества вещества, например расхода сырья, топлива, выработанной продукции за некоторый промежуток времени. При этом наиболее часто применяют метод дискретного интегрирования, основанный на вычислении интеграла по формуле прямоугольников

$$x = \sum_{i=1}^n x_i \Delta t_i, \quad (19.3)$$

где x — интегральное значение параметра за n измерений; Δt_i — длительность i -го интервала времени; x_i — мгновенное значение измеряемого параметра.

Расчет количества продуктов в емкостях, резервуарах по значениям уровня и с учетом текущих значений параметров этих продуктов.

Расчет показателей качества продуктов. Показатели качества продуктов являются одними из основных параметров, по значениям которых осуществляется управление процессами.

Вычислительная техника с ее большими возможностями позволяет не измерять, а рассчитывать показатели качества по текущим значениям тех параметров, которые измеряются точно и оперативно. Для реализации этого необходимо уравнение, связывающее показатель качества и измеряемые параметры. Такие уравнения получают для действующих установок длительной (от нескольких месяцев до года) фиксации данных нормально работающей аппаратуры и обработкой их математическими методами статистики. Как правило, полученные уравнения регрессии — полиномы первой степени, число слагаемых которых не превышает четырех

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4, \quad (19.4)$$

где y — показатель качества; x_1 — x_4 — параметры процесса; a_1 — a_4 — коэффициенты регрессии.

Результаты лабораторных анализов продуктов постоянно вводятся в память ЭВМ, что дает возможность корректировать одновременно с получением достоверных данных уравнения регрессии, изменяя коэффициенты n . Они изменяются таким образом, чтобы погрешность рассчитанного значения y была минимальна.

Расчет технико-экономических показателей (ТЭП). К ТЭП процесса относят величины, комплексно характеризующие ТОУ в данный момент или за определенный интервал времени:

выработку основных и побочных продуктов;

расходы всех видов сырья, топлива, электроэнергии, пара, воздуха, воды, вспомогательных материалов и т. п.;

удельные расходы этих же потоков на 1 т вырабатываемого основного товарного продукта;

производительность ТОУ по сырью и основному продукту;

технологическую себестоимость 1 т основного товарного продукта.

ТЭП процесса необходимы как для управления ТОУ, так и для учета и отчетности. Периодичность их расчетов определяется особенностями ТОУ. Как правило, их считают за час, смену, сутки, декаду и месяц.

Контроль за состоянием ТОУ. По этой функции решается несколько задач. Основной из них является обнаружение отклонений текущих значений параметров за технологические и аварийные пределы. Следующей по важности является задача контроля за состоянием оборудования, учета его пробега и определения сроков ремонта.

Управляющая подсистема. Она предназначена для выработки и реализации управляющих воздействий на ТОУ. Здесь под выработкой понимают определение на основании имеющейся информации рациональных управляющих воздействий, а под

реализацией — действия, обеспечивающие их осуществление. Этой подсистемой выполняются следующие функции.

Регулирование отдельных технологических параметров. Такое регулирование производится традиционными средствами регулирования — регуляторами, которые осуществляют, как правило, регулирование по простейшим П и И-законам регулирования.

Программно-логическое управление заключается в том, что по командам вычислительной техники происходят открытие и закрытие трубопроводов, включение и отключение аппаратов, насосов и компрессоров.

Оптимальное управление, т. е. поиск и выдача оптимальных управляющих воздействий — таких воздействий, которые обеспечивают достижение цели управления. Данная функция — одна из самых сложных и ответственных — выполняется решением уравнений математической модели процесса.

Математическая модель. Это система уравнений математического описания, отражающая сущность явлений, протекающих в реальном объекте. Алгоритм, составленный на основе этой системы, позволяет прогнозировать поведение ТОУ при поступлении возмущающих и управляющих воздействий.

Математические модели строят следующим образом. Прежде всего, выделяют в объекте его основные закономерности и наиболее важные свойства, т. е. идеализируют его, вводя ряд допущений. Необходимо стремиться к тому, чтобы установить максимум допущений и в то же время не упустить какое-либо существенное свойство ТОУ. Затем выделенные основные закономерности описывают математически с использованием известных физических и химических законов. Построив модель, проверяют ее адекватность. Для этого задают реальные начальные и граничные условия и сравнивают результаты расчета с данными измерений на реальном объекте. По результатам анализа модель корректируют, вводя соответствующие коэффициенты.

Описанный метод называется *аналитическим*. По этому методу строят аналитические или, как их еще называют, детерминированные модели, т. е. модели, по которым можно определить цепь причин и следствий. Их используют для математического описания строящихся и проектируемых установок.

Для управления действующими установками используют *статистические* модели, построенные по данным активного и пассивного эксперимента. Активный эксперимент заключается в целенаправленном изменении входных параметров и регистрации реакции объекта на них.

Статистические модели более просты, чем детерминированные. Они представляют собой полиномы первой или второй степени и обладают значительно большей точностью.

Статистические модели могут быть использованы только на тех установках, на которых собирались данные, и в тех интер-

валах изменения параметров, которые были приняты при экспериментах, т. е. использование статистических моделей ограничено — это их недостаток.

19.3. РЕЖИМЫ РАБОТЫ АСУТП

В зависимости от степени участия человека в выполнении функции различают два режима работы АСУТП: автоматизированный и автоматический.

В *автоматизированном режиме* оперативный технологический персонал принимает активное участие в управлении. Возможны следующие варианты реализации этого режима.

Ручное управление, при котором технологический персонал по информации, получаемой по различным каналам о состоянии ТООУ, принимает решения об изменении технологического режима и воздействует на процесс дистанционно из операторной при помощи ручных задатчиков или органов управления или же непосредственно, закрывая или открывая запорную аппаратуру.

Режим «советчика», когда ЭВМ рекомендует технологическому персоналу оптимальные значения наиболее важных режимных параметров, обеспечивающих достижение цели управления.

Технологический персонал на основании своего опыта и знаний анализирует полученные рекомендации, а также информацию о процессе и принимает решение о целесообразности изменения режима. В случае принятия «совета» он вмешивается в работу ТООУ. Недостатком этого режима является то, что оператору часто трудно проверить правильность выработанной ЭВМ рекомендации.

Диалоговый режим, при котором технологический персонал имеет возможность получать по запросу через дисплей дополнительную информацию о настоящем, прошлом и будущем процесса и только после этого принимает решение о целесообразности изменения технологического режима.

Автоматический режим работы АСУТП предусматривает выработку и реализацию управляющих воздействий без участия человека. В настоящее время реализуются:

режим косвенного супервизорного управления (СУ), когда ЭВМ автоматически изменяет уставки и (или) коэффициенты настройки локальных регуляторов;

режим прямого непосредственного цифрового управления (НЦУ), при котором ЭВМ реализует результаты расчетов по поиску оптимальных режимов, воздействуя на исполнительные механизмы.

Из всех перечисленных режимов в настоящее время наиболее распространен режим «советчика».

Режим СУ предусматривается на проектируемых и создаваемых в настоящее время АТК. Наиболее перспективным яв-

ляется режим НЦУ — режим будущего. Однако успешное его внедрение возможно лишь при надежной вычислительной технике, использовании сложных оптимизационных методов поиска наилучших вариантов поведения ТОО, адекватных математических моделей технологических процессов, автоматизации всех смежных технологических процессов на уровне АСУТП, реализации систем регулирования с самонастройкой и многое другое.

19.4. РАБОТА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПЕРСОНАЛА С ПЕРИФЕРИЙНЫМИ УСТРОЙСТВАМИ ЭВМ

Информация, обработанная на ЭВМ, может быть представлена оперативному технологическому персоналу при помощи дисплеев, АЦПУ, световых и цифровых индикаторов, а также звуковых сигнализаторов и регистрирующих вторичных приборов.

Дисплеи являются наиболее эффективным средством отображения информации. При помощи дисплеев персонал оперативно получает большую часть информации, причем в самом льготном — диалоговом режиме, т. е. в режиме вопрос-ответ.

Большая часть оперативной информации, по которой принимаются управленческие решения, может быть не только получена на экране дисплея, но и зафиксирована на *машинограмме* при помощи АЦПУ. Последняя служит также для ведения учета и отчетности.

Отчет о производственной деятельности ТОО за смену и сутки включает сведения о средних расходах входных, выходных и основных рецикловых материальных и энергетических потоков, средних значениях режимных параметров, потерях сырья, значениях качественных показателей и т. д. Отчет о нарушениях технологического режима составляется по итогам работы каждой смены; он содержит сведения о параметрах, по которым были допущены нарушения, и времени нарушений.

На световых и цифровых индикаторах, а также звуковых сигнализаторах представляется информация, позволяющая оперативно оценить состояние ТОО. На цифровые индикаторы по запросу оператора может быть вызван любой параметр, а световые индикаторы, установленные, как правило, на мнемосхеме, дают качественное представление о значениях параметра — не вышел ли он за допустимые пределы.

19.5. ВИДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЙ АСУТП

Выполнение вышеприведенных функций и режимов работ реализуется комплексом взаимодействующих обеспечений АСУТП: техническим, программным, информационным, организационным. Техническое обеспечение содержит весь комплекс технических средств КТС. Состав и структура КТС определяются функциями и режимами работы АСУТП, спецификой ТОО. Определение оптимальной структуры КТС — сложная задача.

Нормальная работа КТС и успешное решение задач управления ТОУ осуществляются на основе программного, информационного и организационного обеспечения АСУТП.

Программное обеспечение (ПО) — совокупность программ, необходимых для реализации функций АСУТП. Его разделяют на общее и специальное ПО. Общее ПО поставляется в комплекте с вычислительной техникой и представляет собой совокупность организующих, служебных и транслирующих программ, программ отладки и диагностики, библиотеки стандартных программ.

Специальное ПО — это совокупность программ, реализующих функции конкретной АСУТП.

Информационное обеспечение (ИО) — это совокупность системы классификации и кодирования технологической и технико-экономической информации, сигналов, характеризующих состояние АТК, массивов данных и документов, необходимых для выполнения всех функций системы. ИО должно полностью характеризовать все потоки и массивы информации в системе.

Организационное обеспечение представляет собой совокупность описаний функций и режимов работ АСУТП, а также ее технической и организационной структур.

Основными документами организационного обеспечения являются инструкции по действию как технологического персонала, так и персонала, обслуживающего вычислительную технику, в условиях функционирования АСУТП.

19.6. КОМПЛЕКС ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ АСУТП

Основой КТС современных АСУТП служат микропроцессорные средства и микро-ЭВМ. Условно их можно разделить на аппаратные, программно-аппаратные и программируемые.

К *аппаратным средствам* относится группа микропроцессорных устройств с жесткой логикой, которая реализуется программами, записанными в постоянном запоминающем устройстве. Их целесообразно применять в тех случаях, когда системой реализуются простые функции (одноконтурное цифровое регулирование, представление данных, индикация, первичная переработка информации, программное логическое управление и т. п.), число обслуживаемых входов и выходов небольшое (до 50), изменения системы не ожидается, емкость запоминающих устройств невелика, а заданное быстродействие высокое.

Программно-аппаратные средства строятся на базе микропроцессорных наборов и микро-ЭВМ. Они проблемно ориентированы на решение конкретных задач АСУТП и предназначены для реализации функций средней сложности (многоконтурное цифровое регулирование, многосвязанное программно-логическое управление, многоканальные сбор, обработка и контроль параметров и т. п.) со средним быстродействием и с большим

числом входов и выходов (до 1000), с обеспечением функциональной гибкости системы.

Программные средства целесообразно применять для выполнения сложных функций, а также управления ТОО большой информационной мощности, характерной для многих химических производств. Они реализуются исключительно на мини- и микро-ЭВМ, специальное программное обеспечение которых составляется таким образом, чтобы выполнялась цель управления. Это сложная и трудоемкая задача.

19.7. АГРЕГАТНЫЕ КОМПЛЕКСЫ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ АСУТП

Агрегатные КТС АСУТП — один из способов унификации технических средств, методов их компоновки, программного математического обеспечения при выполнении стандартных функций контроля, сигнализации, защиты, блокировки и регулирования технологических параметров.

В отличие от традиционных схем управления агрегатные КТС базируются на развитых системах сигнализации отклонения параметров процессов за допустимые пределы и устройствах индикации всей необходимой для управления информации о статике и динамике процесса.

Агрегатные КТС можно использовать как локальные (обособленные) АСУТП с малым и средним числом управляемых параметров, а также как подсистему нижнего уровня иерархических АСУТП. В химической и нефтехимической промышленности начинают широко применять агрегатные КТС следующих типов: комплекс технических средств локальных информационно-управляющих систем (КТС ЛИУС, дальнейшее развитие МИКРОДАТ), программно-технический комплекс МП/ПО-8000, управляющий вычислительный телекомплекс УВТК-УН, комплекс пневматических средств «Режим», система контроля и управления «АСТРА», АСУ «Каскад», АСУ «Эффект», АСУ «Азот».

19.8. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

Основным направлением развития АСУТП является создание распределенных децентрализованных систем управления (РСУ) на базе микропроцессорной техники и микро-ЭВМ (рис. 19.1).

Это связано с рядом существенных преимуществ микропроцессоров и микро-ЭВМ по сравнению с традиционными средствами вычислительной техники; огромные вычислительные возможности, функциональная гибкость, высокое быстродействие, надежность и точность обработки информации, устойчивость к неблагоприятным воздействиям окружающей среды, практически неограниченные возможности в отношении использования периферийного оборудования, простота технического

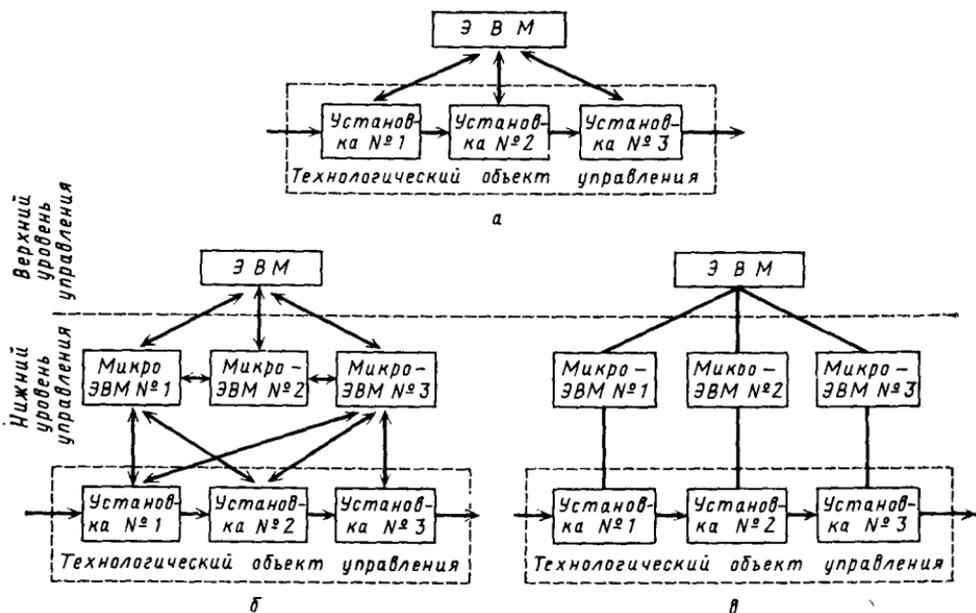


Рис. 19.1. Структурные схемы комплекса технических средств АСУТП:
 а — централизованная система; б — децентрализованная система с функциональным распределением; в — децентрализованная система с территориальным распределением

обслуживания, возможность расширения системы и вместе с тем малая масса и небольшие габариты, низкая стоимость, небольшое энергопотребление.

Различают *функциональное* и *территориальное* разделение в РСУ. Целью функциональной децентрализации (рис. 19.1, б) является снижение сложности процесса управления, достигаемое выделением отдельной функции управления и реализации ее на одной из микро-ЭВМ. Например, на микро-ЭВМ № 1 могут быть возложены все информационные функции, на микро-ЭВМ № 2 — вспомогательные, а на микро-ЭВМ № 3 — управляющие. Это повышает надежность и эффективность системы в целом.

Система же в целом останется работоспособной. Повышение жизнеспособности РСУ объясняется также частичным перекрытием функций, выполняемых отдельными микро-ЭВМ.

Территориальная децентрализация (рис. 19.1, в) предполагает пространственное распределение микро-ЭВМ, что позволяет приблизить средства обработки информации к ее источникам и потребителям, т. е. к установкам ТООУ. Микро-ЭВМ № 1 выполняет например, все функции управления установкой № 1, микро-ЭВМ № 2 — установкой № 2 и т. д.

При создании РСУ соблюдается иерархический принцип управления. Это реализуется тем, что управление отдельными

установками или выполнение отдельных функций осуществляется микро-ЭВМ нижнего уровня управления, а общее управление всей системой возложено на ЭВМ верхнего уровня.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Автоматизированные системы управления предприятиями и объединениями. / Под ред. М. А. Соломатина. М.: Экономика. 1985. 248 с.
- Боборыкин Н. А. и др.* Агрегатные комплексы технических средств АСУТП. Л.: Машиностроение. 1985. 271 с.
- Емельянов А. И., Капник О. В.* Проектирование систем автоматизации технологических процессов. М.: Энергоатомиздат. 1985, 400 с.
- Голубятников В. А., Шувалов В. В.* Автоматизация производственных процессов в химической промышленности. М.: Химия, 1985, 432 с.
- Захарский А. М. и др.* Проектирование комплексов технических средств АСУ на базе малых ЭВМ. М.: ЦНИИТЭприборостроение. ТС-3. Вып. 4. 1984. С. 55.
- Казьмин А. И. и др.* Распределенный вычислительный комплекс для управления технологическими процессами. М.: Институт проблем управления. 1984. С. 47.
- Кулаков М. В.* Технологические измерения и приборы. М.: Машиностроение. 1983. 424 с.
- Пиггот С. Г.* Интегрирование АСУ химическими производствами. М.: Химия. 1985. 120 с.
- Склярский Э. И., Розанов Г. Г., Широколова А. В. и др.* Системы централизованного контроля и управления на базе пневмоэлектронных комплексов. М.: ЦНИИТЭнефтехим. 1983. С. 49.
- Стефани Е. П.* Основы построения АСУТП. М.: Энергоиздат. 1982. 354 с.
- Сухомлинов М. М. и др.* Комплексы технических средств децентрализованных АСУТП. М.: ЦНИИТЭприборостроения. ТС-3. Вып. 3, 1983. С. 39.
- Тучинский М. Р., Родных Ю. В.* Автоматизированные системы управления производством олефинов. М.: Химия, 1985. 304 с.
- Мелюшев Ю. К.* Основы автоматизации химических производств. М.: Химия, 1973. 358 с.
- Шкатов Е. Ф.* Автоматизация промышленной и санитарной очистки газов. М.: Химия, 1981. 200 с.
- Шкатов Е. Ф.* Технические измерения и КИП на предприятиях химической промышленности. М.: Химия, 1986. 320 с.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Абсолютно черное тело 109
Автоматизация процессов 254 сл.
 абсорбции 272
 адсорбции 275
 анализа параметров 280
 выпаривания 265
 кристаллизации 267
 нагревания 262
 оптимизация 272
 отставания жидких систем 257
 перемещения жидкостей и газов 254
 распределения грузов 280
 регистрации параметров 280
 ректификации 268
 смешения жидкостей 256
 сушки 275
 фильтрования 260
 центрифугирования 259
Автоматизированный технологический комплекс 288
Автоматизированные системы управления (АСУ) 153, 284, 285, 286
Автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУТП) 288
 информационная подсистема 289
 комплекс технических средств (КТС) 295, 296
 критерий управления 288
 модель математическая 292
 назначение 288
 принцип действия 288
 режимы работы 293
 территориальное разделение 297
 управляющая подсистема 291
 функции 289
 функциональное разделение 297
Адаптация системы 285
Алгоритм управления 152
Анализ газовый 137 сл.
Анализируемая смесь 114
Алфавитно-цифровое печатающее устройство (АЦПУ) 289, 294
Аэропитатель 283

Биметаллические элементы 84
Блокировка 242

Вариация показаний 14
Весы 47, 48, 59
Вибропитатель 282
Вискозиметры 135, 136
Влагомеры 131, 133
Влажность материалов 130, 131
Возмущающие воздействия 150, 169, 225
Вольфрам-ренийевый преобразователь 97

Время
 газохроматографического удерживания 147
 предварения регулятора 184
Вторичные приборы 16, 21, 23, 196, 224
Вязкость жидкостей 134

Газоанализаторы 114, 137
 оптико-акустические 140
 термокондуктометрические 138
 термомагнитные 139
 ультрафиолетового поглощения 141
 физические 138
 химические 137
Гигрометр 131

Давление 26, 27, 39
Детектор газохроматографический 144
Деформационные приборы 29 сл.
Диаграммы 25
Диафрагмы 54
Динамическая характеристика элемента 158
Дисплей 294
Дистанционная передача 228
Дистанционные системы контроля 8
Дифманометры 37, 55, 73
Дозаторы 47, 49
Дозирование массы 47 сл.
Документация конструкторская 226, 227, 247
Дросселирование потока 255
Дроссель винтовой 221
Дублиеры 201

Единицы измерения вязкости 134
 давления 26
 качества материалов 113
 количества вещества 41
 концентрации 13
 плотности 125
 расхода вещества 41
 состава материалов 113
 температуры 79
Емкость
 гидравлическая 221
 объекта регулирования 166

Железо-константановые преобразователи 97
Жидкости
 контроль уровня 69 сл.
 перемещение 254

- Задатчик** 191
Закон
 Кольрауша 115
 Ньютона 134
 поглощения воли 140
 регулирования 174
 Фарадея 65
 Шарля 85
 запаздывание объекта 88, 168, 169
 Запирающая жидкость 46
 Заслонки регулирующие 206
 Защита от коррозии средств измерения 39
Звенья САР
 аperiodическое 159
 дифференцирующее 160
 интегрирующее 160
 колебательное 159
 объекты регулирования 162
 параллельное соединение 161
 последовательное соединение 161
 усилительное 158
 цепь обратной связи 162
 чисто запаздывания 161
Зеебека эффект 95

Излучение тепловое 108
 интегральное 109
 яркость 109
Измерения средства 23 сл.
Измерительные устройства 23 сл.
 блоки 34
 термометров сопротивления 90
Индикаторы 75
Интеграторы 42, 57, 215
Информационная подсистема 289
 контроль за состоянием ТОУ 291
 первичная переработка информации 290
 расчет показателей качества 291
 — технико-экономических показателей 291
 сбор информации 290
Информационное обеспечение 295
Информация оперативная 9
Исполнительный механизм 150, 197, 198
 кривошипный 222
 мембранный 201
 поршневой 201
 прямого хода 222
 электромагнитный 218

Калориметрический метод 119
Клапаны 202, 203, 204, 205
Количество веществ 41, 47
Колориметрический метод 123
Комплекс технических средств (КТС)
 294
 агрегатные 296
 аппаратные средства 295
 информационное обеспечение 295
 организационное обеспечение 295

Комплекс технических средств (КТС)
 программно-аппаратные средства 295, 296
Кондуктометрический метод 114, 116, 130, 133
Кондуктометры 116
Контроль
 давления 26 сл.
 дистанционный 8
 качества материалов 113 сл.
 количества материалов 41 сл.
 концентрации материалов 114
 расхода материалов 41 сл.
 состава материалов 113 сл.
 сыпучих материалов 69 сл.
 температуры 79, 107
 уровня жидкостей 69 сл.
Концентрация
 водородных ионов 123
 растворов 114 сл.
Коэффициент
 емкости объекта 166
 лучеиспускания 109
 расхода 52
 экономической эффективности внедрения АСУ 287

Логометры 92
Манометры
 взрывозащищенный 36
 грузопоршневой 32
 дифференциальный 73
 жидкостной 27
 мембранный 30, 32
 с наклонной трубкой 28
 пневматический 36, 37, 38
 поршневой 33
 пружинно-мембранный 30
 пружинно-сильфонный 30
 пружинный 30
 сильфонный 30, 36
 чашечный 28
 электрический 33
Масс-спектрометрия 147
Материалы
 контроль количества 41
 — расхода 41
Машины централизованного контроля (МЦК) 9
Медь-константановые преобразователи 97
Медь-концелевые преобразователи 97
Местные системы контроля 7
Методы измерения 9 сл.
 бесконтактной высокочастотной кондуктометрии 119
 дифференциальный (разностный) 10
 калориметрический 119
 качество измерения 10
 колориметрический 123
 кондуктометрический 114, 130, 133
 непосредственной оценки 9

- Методы измерения
 оптические 119
 поляриметрический 121
 потенциометрический 123
 психрометрический 130, 131
 рефрактометрический 120
 сорбционный 130
 сорбционно-кулонометрический 133
 спектрометрический 120, 130
 сравнения с меркой 10
 теплопроводности 130
 точки росы 131
 электрохимический 130
 Метрология, основы 9 с.л.
 Микроанометр 28
 Миллиметрметр 92
 Милливольтметры 99
 Модель
 математическая 292
 статистическая 292
 Модуль сужающего устройства 51
 Мост измерительный 91
 автоматический 94
 неуравновешенный 91
 уравновешенный 90

 Напор, потери 42
 Насосы-дозаторы 47
 Нулевой газ 114

 Обозначения условные 243
 графическое 228
 построение 230
 Образцовое вещество 23
 Обратная связь 162
 Объект регулирования 149
 возмущающие воздействия 169
 емкость 165
 запаздывание 168, 169
 классификация 162
 многоемкостные 165, 168
 нейтральные 166
 однородные 165, 168
 разгонная характеристика 168
 с распределенными параметрами 163
 с самовыравниванием 166
 свойства 162, 165
 с сосредоточенными параметрами 163
 управления 288
 Оптимизаторы 157, 158
 Оптические методы 119
 Отсчетное устройство 24

 Панель дистанционного управления 211
 Пельтье эффект 132
 Передаточная функция 162
 Переходный процесс 153
 Пирометры излучения 81, 108 с.л.
 квасимонохроматический 81, 110
 Пирометры излучения
 полного излучения 81
 спектрального отношения 81, 112
 фотоэлектрический 110
 Питатель 282, 283
 Платинородий-платиновые преобразователи 97
 Плотномеры 125, 126, 127, 129
 Плотность жидкостей, измерение 124 с.л.
 Пневмостомкость 191
 Поверочная газовая смесь 114
 Погрешность измерений 10
 Позиционеры 199, 222
Ползунова — *Уатта* принцип регулирования по отклонению 151
 Поляриметр 122
 Поляриметрический метод 121
Понселе принцип регулирования по нагрузке 151
 Потенциометрический метод 123
 Потенциометры 103
 автоматические 99, 104
 лабораторные 99
 переносные 99, 104
 электронные 105
 Предельно допустимая концентрация 114
 Преобразователи измерительные 14 с.л., 228
 дифференциально-трансформаторные 15
 контактные 106
 магнитомодуляционные 15
 масштабные 14
 нестандартные 97
 нормирующий 14
 первичный 14
 плотности сильфонный 128
 пневматические 15, 17
 пневмоэлектрические 22
 «Сапфир» 33, 34
 сельсинные 15
 силовой компенсации 18
 счетчик «Тургас» 67
 термоэлектрический 95
 ферродинамические 15
 электрические 15
 электропневматические 21
 Программного регулирования системы 152
 Проект 227
 Пропускная способность, условная 207
 Психрометр 131
 Психрометрический метод 130, 131
 Пульты 232
 рН-метрия 123

 Разделительные устройства 40
 Рассогласование 150
 Расход вещества 41

Расход вещества
единицы измерения 41
измерение методом переменного
перепада давлений 50 сл.
коэффициент расхода 52
массовый 41, 50
номинальный 42
объемный 41, 50
характерный 42

Расходомеры 42, 50, 53
переменного перепада давлений
42, 50 сл.
постоянного перепада давлений
42, 61, сл.
правила установки 58
— эксплуатации 58
турбинные 66
ультразвуковые 68
электромагнитные 42, 64

Регулирование
байпасированием 263
по возмущению 275
и вычислительные машины 272
дресселированием потока 255
изменением числа оборотов 256
каскадно-связанное 263, 271
мельниц 283
параметров на тарелках 271
при различных целях управления
255
состава 274
сушилок 277
в теплообменниках смещения 264
толщины осадка 260
в топках 264
уровня жидкости 257
и экстремальные регуляторы 272

Регулирующие органы 150, 202

Регуляторы автоматические 149,
173 сл.
выбор типа 225
гидравлические 219
закон регулирования 174
зона нечувствительности 176
интегральные (И-регуляторы) 174,
176
исполнительные механизмы 197,
218
классификация 173
косвенного (непрямого) действия
174, 187
с линейными законами регулиро-
вания 174
с нелинейными законами регулиро-
вания 174
непрерывного действия 174
пневматические 187, 197
позиционные 175, 191, 213
с предварением 184
предел пропорциональности 179
прерывистого действия 174
приборного типа 174

Регуляторы автоматические
пропорциональное дифференциаль-
ное (ПД-регуляторы) 174
пропорционально-интегрально-
дифференциальные (ПИД-регу-
ляторы) 174
пропорционально-интегральные
(ПИ-регуляторы) 174, 180, 193
пропорциональные (П-регулято-
ры) 174, 178, 192
прямого действия 174, 186
системы «Старт» 188, 222
соотношения 257
температуры 188
ферродинамический 214
электрический 213, 218

Редуктор давления 210

Рефрактометр 121

Рефрактометрический метод 120

Ротаметры 61
с дифференциально-трансформа-
торным преобразователем 64
с пневматической дистанционной
передачей 63
со стеклянной трубкой 62

Самовыравнивание объекта 166

Самонастраивающиеся системы 157

Самопишущие приборы 24

Сигнализаторы 74

Сигнализация 242

Сильфонные трубки 40

Системный подход 285

Системы автоматического регулиро-
вания (САР) 149 сл.
алгоритм управления 152
аперiodически сходящийся про-
цесс 154
давления газа в емкости 151
динамическая характеристика эле-
мента 158
заданное значение 150
замкнутые 152
классификация 152
комбинированные системы 151
кривая переходного процесса 154
по нагрузке 151
непрямого действия 156
неустойчивая 155
остаточное отклонение 155
принцип регулирования по откло-
нению 151
программного регулирования 152
прямого действия 155
разомкнутые 152
равновесное состояние 153
самонастраивающиеся 157
следящие 152
статическая ошибка регулирова-
ния 155
характеристика элемента 158
текущее значение 150

- Системы автоматического регулирования (САР)
 - типовые звенья см. Звенья САР
 - устойчивая 155
 - функциональная схема 150
 - экстремального регулирования 153
- Системы стабилизации 152
- Системы экстремального регулирования (СЭР) 157
- Соединительные линии 59, 101
 - для водяного пара 59
 - газов 59
 - жидкостей 61
- Сопла стандартные 54, 55
- Сорбционно-кулонометрический метод 133
- Сорбционный метод 130
- Спектрометрический метод 120, 130
- Стабилизации системы 152
- Стандартный образец 23
- Станция управления 228
- Статическая характеристика элемента 158
- Стекла указательные 69
- Сужающие устройства 51, 53
- Супервизорное управление (СУ) 293
- Счетчики 41
 - барабанный 45
 - с винтовой вертушкой 43
 - калибр 42
 - крыльчатые 43
 - массовые 42
 - многоструйный 44
 - обозначение типа 45
 - объемные 42, 44
 - одноструйный 44
 - потери напора 42
 - ротационные 46
 - роторные 45
 - скоростные 42
 - измерение уровня 77 сл.
- Сыпучие материалы, контроль уровня 69 сл.
- Телеизмерительные системы контроля 9
- Температура
 - единицы измерения 79
 - измерение контактными преобразователями 106
 - контроль 79
 - определяющие постоянные точки 80
 - приборы измерения 80 сл.
- Теплопроводность 130
- Термобаллоны 85
- Термометры
 - биметаллические 84
 - с вложенной шкалой 82
 - газовые 85
 - жидкостные 85
 - конденсационные 85
 - контактные 83
- Термометры
 - лабораторные 83
 - манометрические 81, 84
 - медные 89
 - образцовые 83
 - палочный 82
 - платиновые 89
 - полупроводниковые 90
 - промышленные 88
 - расширения 81
 - ртутные 82
 - сопротивления 81, 88
 - спиртовые 82
 - термоэлектрические 81, 95
 - технические 83
 - шкала 86
- Термопары 97 сл.
- Терморезисторы 89
- Термоэлектрические преобразователи (ТЭП) 95
 - многозонный 99
 - с передвижным фланцем 98
- Технологическое предложение 227
- Технологический процесс 252
- Технологический режим 253
- Точка росы 130, 131
- Указатель уровня 78, 79
- Унифицированные сигналы 26
- Управление
 - абсорбцией 272
 - выпариванием 265
 - гидромеханическими процессами 254
 - дозированием 281
 - измельчением 283
 - кристаллизацией 267
 - массообменными процессами 268
 - механическими процессами 280
 - нагреванием жидкостей 262
 - объект 252
 - оптимальное 292
 - отстаиванием жидких систем
 - перемещением твердых материалов 280
 - программно-логическое 292
 - регулирование при различных целях 255
 - ректификацией 268
 - система 253
 - смешением жидкостей 256
 - сушкой 275
 - тепловыми процессами 262
 - технологическими процессами 252 сл.
 - фильтрованием 260
 - центрифугированием систем 259
- Управляющая вычислительная машина (УВМ) 153

- Управляющая подсистема 291
 - оптимальное управление 292
 - регулирование параметров 292
 - программно-логическое управление 292
- Уравнение
 - Бернулли 51
 - Вина 109
 - Планка 109
 - расхода 52
- Уровнемеры
 - буйкового типа 72
 - визуальные 69
 - гидростатический 72
 - лотовый 78
 - поплавковый 70
 - пьезометрический 73
 - радиоизотопный 75
 - со следящей системой 74
 - ультразвуковой 76
 - электрические 74
- Усилитель
 - мощности 190
 - операционный 220
- Фильтры воздуха 209
- Фотокolorиметры 119
- Хроматограмма 145
 - дрейф нуля 145
 - пик 145
 - шумы 145
- Хроматограф газовый 143
 - детектор 144
 - испаритель 144
 - колонка 144
 - термостат колонок 144
- Хроматермография 142, 143
 - время газохроматографического удерживания 147
 - газовая 142, 143
 - газожидкостная 142
 - нестационарная 143
 - стационарная 143
- Хромель-алюмелевый преобразователь 97
- Хромель-копелевый преобразователь 97
- Цифровой аналоговый преобразователь (ЦАП) 217
- Централизованного контроля системы 9
- Чувствительный элемент 88, 108, 228, 288
- Шкала приборов 24, 86
- Экстремального регулирования системы 153
- Электрокондуктометрия бесконтактная 118
- Электропроводность 115
- Электрохимический метод 130
- Элемент сравнения 150, 189
- Эскизный проект 227
- Яркость спектральная энергетическая 109