

Однако при неблагоприятных динамических характеристиках каналов регулирования (большом чистом запаздывании, большом отношении  $\tau/T$ ) даже в случае оптимальных настроек регуляторов качество переходных процессов в одноконтурных АСР может оказаться неудовлетворительным. Для таких объектов анализируют возможность построения многоконтурных АСР, в которых качество регулирования можно повысить, усложняя схемы автоматизации, т. е. применяя каскадные, комбинированные, взаимосвязанные АСР.

Окончательное решение о применении той или иной схемы автоматизации принимают после моделирования различных АСР и сравнения качества получаемых процессов регулирования.

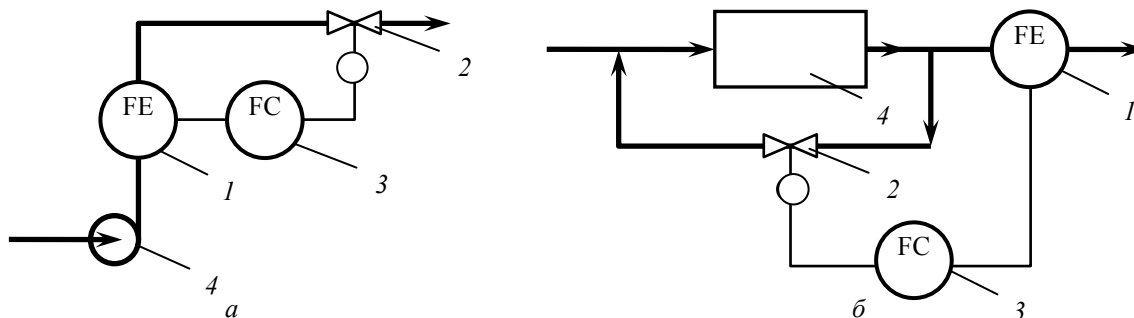
### 3. Регулирование основных технологических параметров.

#### 3.1. Регулирование расхода, соотношения расходов

В системах регулирования расхода применяют один из трех способов изменения расхода:

1. дросселирование потока вещества через регулирующий орган, устанавливаемый на трубопроводе (клапан, шибер, заслонка);
2. изменение напора в трубопроводе с помощью регулируемого источника энергии (например, изменением числа оборотов двигателя насоса или угла поворота лопастей вентилятора);
3. байпасирование, т. е. переброс избытка вещества из основного трубопровода в обводную линию.

Регулирование расхода после центробежного насоса осуществляется регулирующим клапаном, устанавливаемым на нагнетательном трубопроводе (рис. 3.1, а). При использовании поршневого насоса, применение подобной АСР недопустимо, так как при работе регулятора клапан может закрыться полностью, что приведет к разрыву трубопровода (или к помпажу, если клапан установлен на всасе насоса). В этом случае для регулирования расхода используют байпасирование потока (рис. 3.1, б).

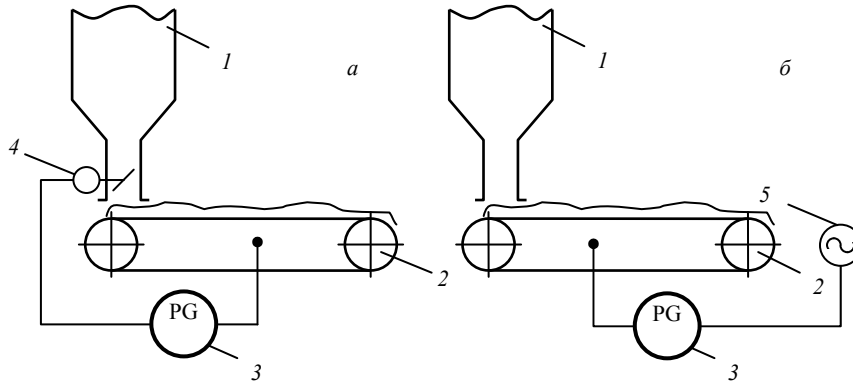


**Рис. 3.1.** Схемы регулирования расхода после центробежного (а) и поршневого (б) насосов.

1 – измеритель расхода; 2 – регулирующий клапан; 3 – регулятор; 4 – насос.

Регулирование расхода сыпучих веществ осуществляется изменением степени открытия регулирующей заслонки на выходе из бункера (рис 3.2, а), либо изменением скорости

движения ленты транспортера. Измерителем расхода при таком варианте служит взвешивающее устройство, которое определяет массу материала на ленте транспортера (рис 3.2, б).

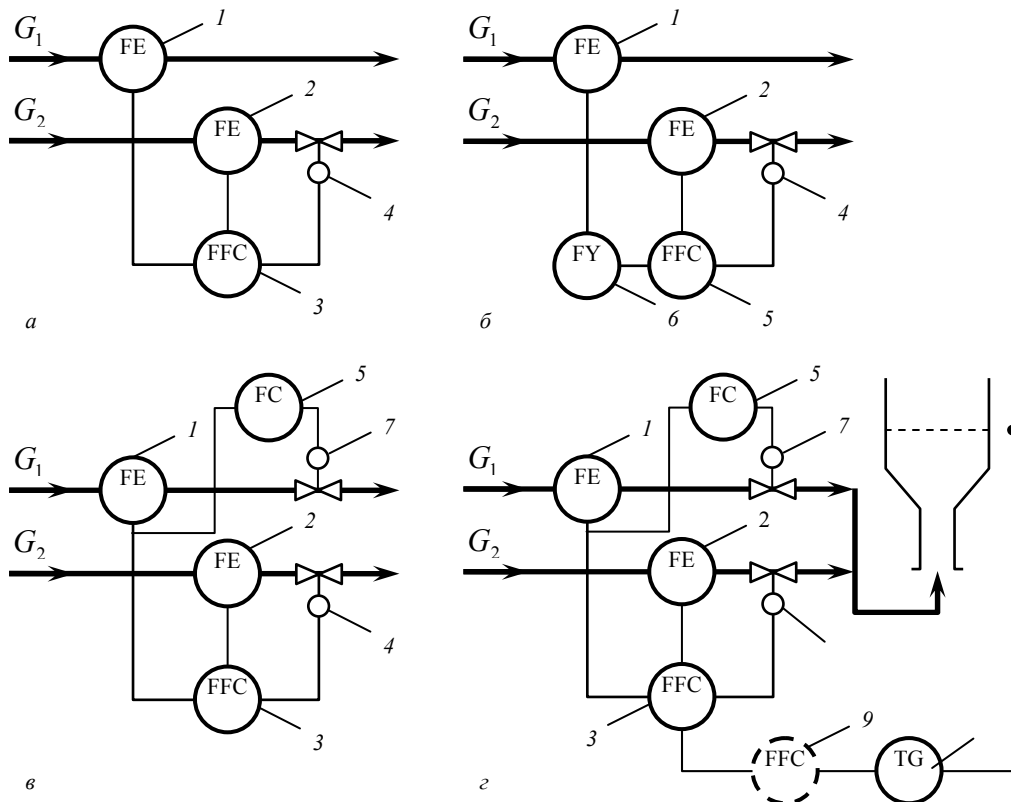


**Рис. 3.2.** Схемы регулирования расходов сыпучих веществ:

1 – бункер; 2 – транспортер; 3 – регулятор; 4 – регулирующая заслонка; 5 – электродвигатель.

Регулирование соотношения расходов двух веществ можно осуществлять тремя способами:

1. При незаданной общей производительности расход одного вещества (рис. 3.3, а)  $G_1$ , называемый «ведущим», может меняться произвольно; второе вещество подается при постоянном соотношении  $\gamma$  с первым, так что «ведомый» расход равен  $\gamma G_1$ . Иногда вместо регулятора соотношения используют реле соотношения и обычный регулятор для одной переменной (рис. 3.3, б). Выходной сигнал реле  $\delta$ , устанавливающего заданный коэффициент соотношения  $\gamma$ , подается в виде задания регулятору 5, обеспечивающему поддержание «ведомого» расхода.



**Рис. 3.3.** Схемы регулирования соотношения расходов.

1, 2 – измерители расхода, 3 – регулятор соотношения, 4, 7 – регулирующие клапаны; 5 – регулятор расхода, 6 – реле соотношения, 8 – регулятор температуры, 9 – устройство ограничения.

2. При заданном «ведущем» расходе кроме АСР соотношения применяют и АСР «ведущего» расхода (рис. 3.3, в). При такой схеме в случае изменения задания по расходу  $G_1$  автоматически изменится и расход  $G_2$  (в заданном соотношении с  $G_1$ ).
3. При заданной общей нагрузке и коррекции коэффициента по третьему параметру. АСР соотношения расходов является внутренним контуром в каскадной системе регулирования третьего технологического параметра  $y$  (например, температуры в аппарате). При этом заданный коэффициент соотношения устанавливается внешним регулятором в зависимости от этого параметра, так что  $G_2 = \gamma(y)G_1$  (рис. 3.3, з). Особенность настройки каскадных АСР состоит в том, что на задание внутреннему регулятору устанавливают ограничение  $x_{рн} \leq x_p \leq x_{рв}$ . Для АСР соотношения расходов это соответствует ограничению  $\gamma_n \leq \gamma \leq \gamma_v$ . Если выходной сигнал внешнего регулятора выходит за пределы  $[x_{рн}, x_{рв}]$ , то задание регулятору соотношения остается на предельно допустимом значении  $\gamma$  (т. е.  $\gamma_n$  или  $\gamma_v$ ).

### 3.2. Регулирование уровня.

Уровень является косвенным показателем гидродинамического равновесия в аппарате. Постоянство уровня свидетельствует о соблюдении материального баланса, когда приток жидкости равен стоку, и скорость изменения уровня равна нулю.

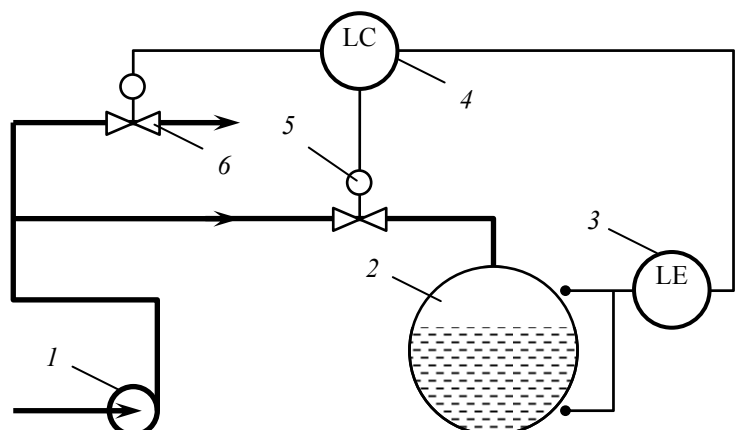
В общем случае изменение уровня описывается уравнением вида

$$S \frac{dL}{dt} = G_{\text{вх}} - G_{\text{вых}} \pm G_{\text{об}},$$

где  $S$  – площадь горизонтального (свободного) сечения аппарата;  $G_{\text{вх}}, G_{\text{вых}}$  – расходы жидкости на входе в аппарат и выходе из него;  $G_{\text{об}}$  – количество жидкости, образующейся (или расходуемой) в аппарате в единицу времени.

В зависимости от требуемой точности поддержания уровня применяют один из следующих двух способов регулирования:

1. позиционное регулирование, при котором уровень в аппарате поддерживается в заданных, достаточно широких пределах:  $L_v \leq L \leq L_n$ . Такие системы регулирования устанавливают на сборниках жидкости или промежуточных емкостях (рис. 3.4). При достижении предельного значения уровня происходит автоматическое переключение потока на запасную емкость;



**Рис. 3.4.** Схема позиционного регулирования уровня:

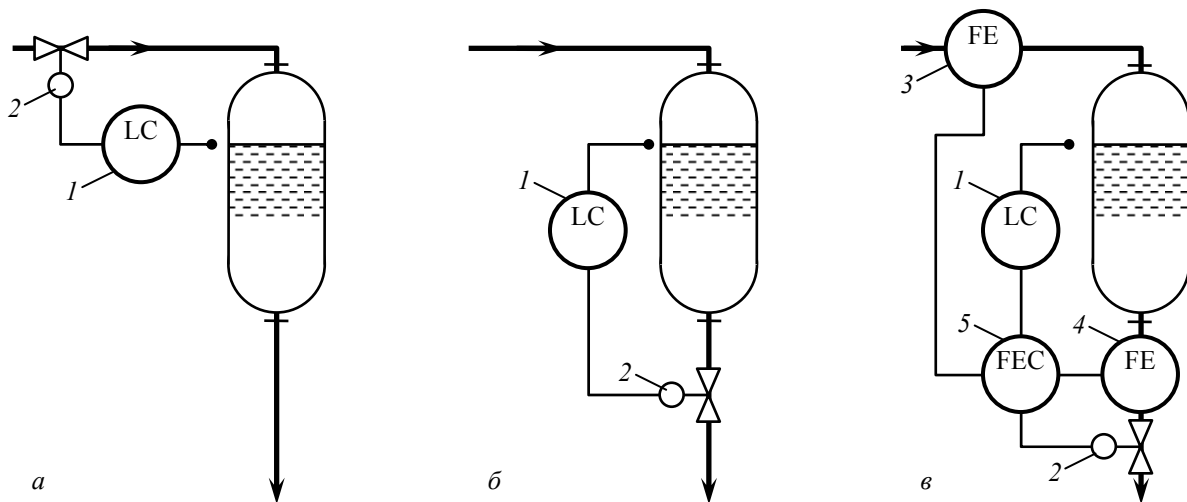
1 – насос; 2 – аппарат; 3 – сигнализатор уровня; 4 – регулятор уровня; 5, 6 – регулирующие клапаны.

2. непрерывное регулирование, при котором обеспечивается стабилизация уровня на заданном значении, т. е.  $L = L^0$ .

Особенно высокие требования предъявляются к точности регулирования уровня в теплообменных аппаратах, в которых уровень жидкости существенно влияет на тепловые процессы. Например, в паровых теплообменниках уровень конденсата определяет фактическую поверхность теплообмена. В таких АСР для регулирования уровня без статической погрешности применяют ПИ–регуляторы. П–регуляторы используют лишь в тех случаях, когда не требуется высокое качество регулирования и возмущения в системе не имеют постоянной составляющей, которая может привести к накоплению статической погрешности.

При отсутствии фазовых превращений в аппарате уровень в нем регулируют одним из трех способов:

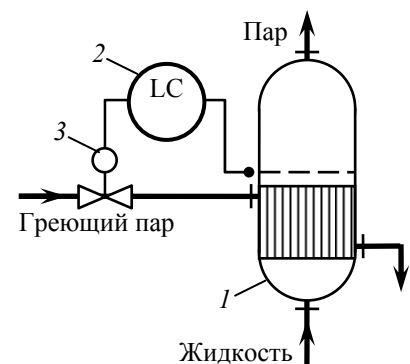
1. изменением расхода жидкости на входе в аппарат (регулирование «на притоке», рис. 3.5, а);
2. изменением расхода жидкости на выходе из аппарата (регулирование «на стоке», рис. 3.5, б);



**Рис. 3.5.** Схемы непрерывного регулирования уровня:

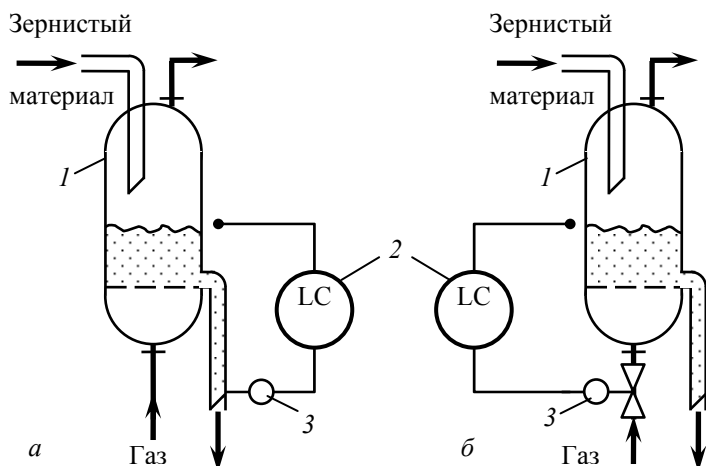
а – регулирование «на притоке»; б – регулирование «на стоке», в – каскадная АСР (1 – регулятор уровня, 2 – регулирующий клапан, 3, 4 – измерители расхода, 5 – регулятор соотношения).

3. регулированием соотношения расходов жидкости на входе в аппарат и выходе из него с коррекцией по уровню (каскадная АСР, рис. 3.5, в); отключение корректирующего контура может привести к накоплению ошибки при регулировании уровня, так как вследствие неизбежных погрешностей в настройке регулятора соотношения расходы жидкости на входе и выходе аппарата не будут точно равны друг другу, и вследствие интегрирующих свойств объекта, уровень в аппарате будет непрерывно нарастать (или убывать).



**Рис. 3.6.** Схема регулирования уровня в испарителе: 1 – испаритель; 2 – регулятор уровня, 3 – регулирующий клапан.

В случае, когда гидродинамические процессы в аппарате сопровождаются фазовыми превращениями, можно регулировать уровень изменением подачи теплоносителя (или хладагента). В таких аппаратах уровень взаимосвязан с другими параметрами (например, давлением), поэтому выбор способа регулиро-



**Рис. 3.7.** Регулирование уровня кипящего слоя:

*а* – отводом зернистого материала, *б* – изменением расхода газа (1 – аппарат с кипящим слоем, 2 – регулятор уровня, 3 – регулирующий орган).

колебаниях расхода газа (или расхода зернистого материала) наступает режим уноса слоя или его оседания. Поэтому к точности регулирования уровня кипящего слоя предъявляют особо высокие требования. В качестве регулирующих воздействий используют расход зернистого материала на входе или выходе аппарата (рис. 3.7, *а*) или расход газа на ожижение слоя (рис. 3.7, *б*).

### 3.3. Регулирование давления

Давление является показателем соотношения расходов газовой фазы на входе в аппарат и выходе из него. Постоянство давления свидетельствует о соблюдении материального баланса по газовой фазе. Обычно давление (или разрежение) в технологической установке стабилизируют в каком-либо одном аппарате, а по всей системе оно устанавливается в соответствии с гидравлическим сопротивлением линии и аппаратов. Например, в многокорпусной выпарной установке (см. рис. 3.8, *а*) стабилизируют разрежение в последнем выпарном аппарате. В остальных аппаратах при отсутствии возмущений устанавливается разрежение, которое определяется из условий материального и теплового балансов с учетом гидравлического сопротивления технологической линии.

В тех случаях, когда давление существенно влияет на кинетику процесса (например, в процессе ректификации), предусматривается система стабилизации давления в отдельных аппаратах (рис. 3.8, *б*). Кроме того, при регулировании процесса бинарной ректификации часто в качестве косвенного показателя состава смеси используют ее температуру кипения, которая однозначно связана с составом лишь при постоянном давлении. Поэтому в продуктовых ректификационных колоннах обычно предусматривают специальные системы стабилизации давления.

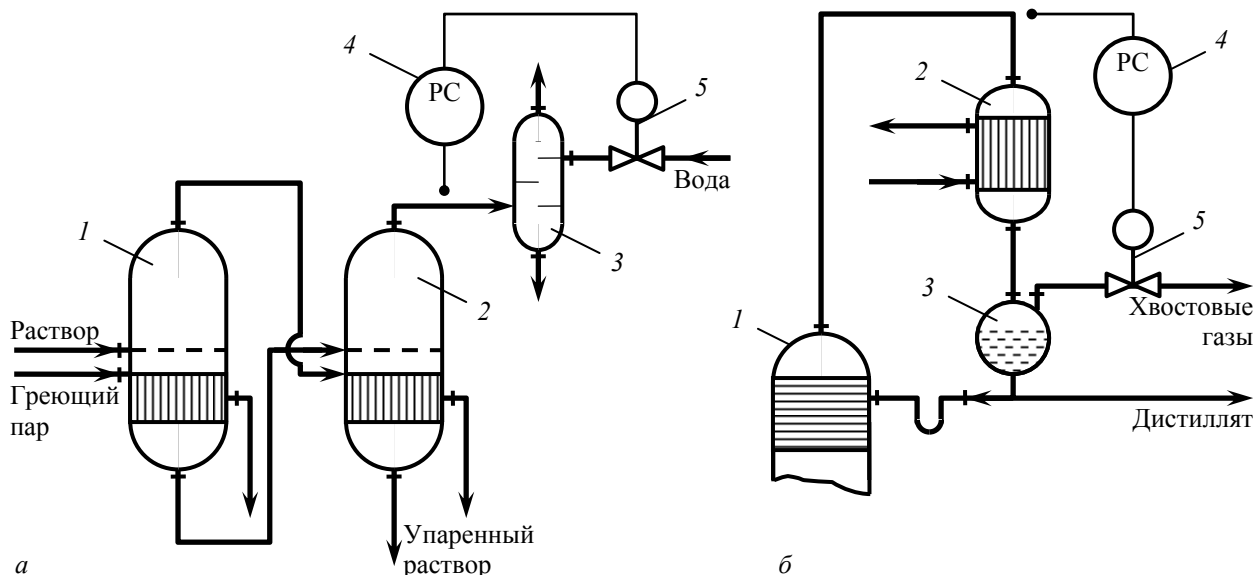


Рис. 3.8

а – регулирование разряжения в многокорпусной выпарной установке:

1,2 – выпарные аппараты; 3 – барометрический конденсатор; 4 – регулятор разряжения; 5 – регулирующий клапан.

**Регулирование разряжения в многокорпусной выпарной установке.** В данной системе регулирующим воздействием является расход охлаждающей воды в барометрический конденсатор, который влияет на скорость конденсации вторичного пара.

**Регулирование перепада давления.** В таких аппаратах регулируется перепад давления,

характеризующий гидродинамический режим, который влияет на протекание процесса (рис. 3.9).

### 3.4. Регулирование температуры.

Температура является показателем термодинамического состояния системы и используется как выходная координата при регулировании тепловых процессов. Динамические характеристики объектов в системах регулирования температуры зависят от физико-химических параметров процесса и конструкции аппарата. Поэтому общие рекомендации по выбору АСР температуры сформулировать невозможно, и требуется анализ каждого конкретного процесса.

б – АСР давления в ректификационной колонне:

1 – колонна; 2 – дефлегматор; 3 – флегмовая ёмкость; 4 – регулятор давления; 5 – регулирующий клапан.

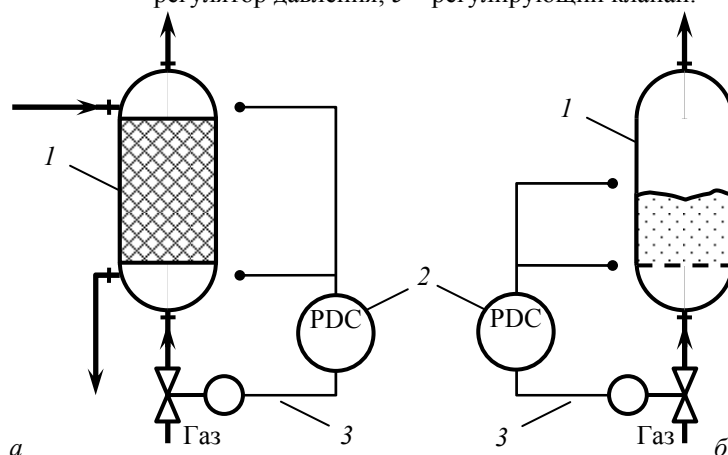
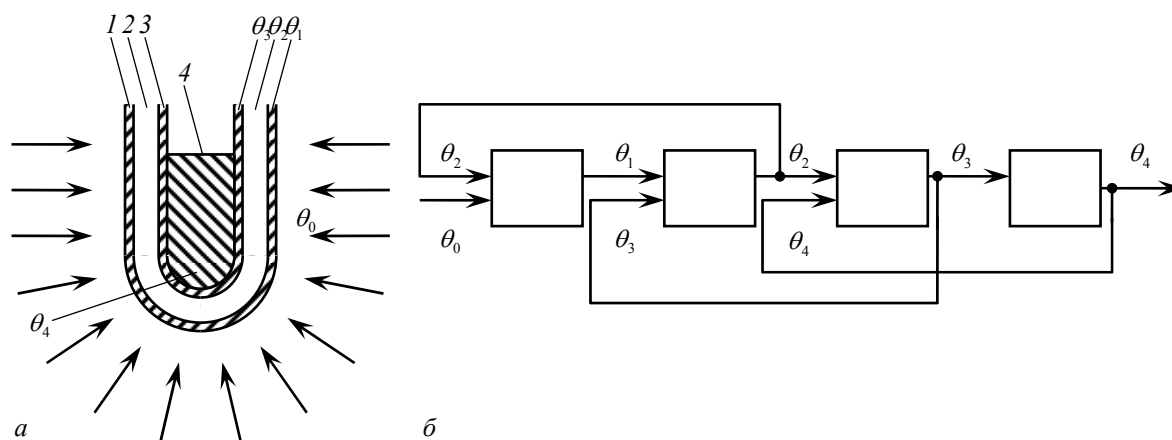


Рис. 3.9. Схема регулирования перепада давления:

а – в колонном аппарате с насадкой; б – в аппарате с кипящим слоем (1 – аппарат; 2 – регулятор перепада давления; 3 – регулирующий клапан).

К общим особенностям АСР температуры можно отнести значительную инерционность тепловых процессов и промышленных датчиков температуры. Поэтому одна из основных задач при проектировании АСР температуры – уменьшение инерционности датчиков.

Рассмотрим, например, динамические характеристики термометра в защитном чехле (рис. 3.10).



**Рис. 3.10.** Принципиальная (а) и структурная (б) схемы термометра:

1 – защитный чехол; 2 – воздушная прослойка; 3 – стенка термометра; 4 – рабочая жидкость.

Структурную схему термометра можно представить как последовательное соединение четырех тепловых емкостей (рис. 3.10, б): защитного чехла 1, воздушной прослойки 2, стенки термометра 3 и собственно рабочей жидкости 4. Если пренебречь тепловым сопротивлением каждого слоя, то все элементы можно аппроксимировать аperiodическими звеньями 1-го порядка, уравнения которых имеют вид:

$$M_j c_{pj} \frac{d\theta_j}{dt} = \alpha_{j1} F_{j1} (\theta_{j-1} - \theta_j) - \alpha_{j2} F_{j2} (\theta_j - \theta_{j+1}),$$

$$j = \overline{1,4}; \quad \theta_5 = 0$$

или

$$T_j \frac{d\theta_j}{dt} + \theta_j = k_{j1} \theta_{j-1} + k_{j2} \theta_{j+1},$$

где

$$T_j = \frac{M_j c_{pj}}{\alpha_{j1} F_{j1} - \alpha_{j2} F_{j2}}; \quad (3.1)$$

$$k_{j1} = \frac{\alpha_{j1} F_{j1}}{\alpha_{j1} F_{j1} - \alpha_{j2} F_{j2}}; k_{j2} = \frac{\alpha_{j2} F_{j2}}{\alpha_{j1} F_{j1} - \alpha_{j2} F_{j2}};$$

$M_j$  – масса соответственно чехла, воздушной прослойки, стенки и жидкости;  $c_{pj}$  – удельные теплоемкости;  $\alpha_{j1}$ ,  $\alpha_{j2}$  – коэффициенты теплоотдачи;  $F_{j1}$ ,  $F_{j2}$  – поверхности теплоотдачи.

Как видно из уравнений (3.1), основными направлениями уменьшения инерционности датчиков температуры являются:

- повышение коэффициентов теплоотдачи от среды к чехлу в результате правильного выбора места установки датчика; при этом скорость движения среды должна быть максимальной; при прочих равных условиях более предпочтительна установка термомет-

ров в жидкой фазе (по сравнению с газообразной), в конденсирующемся паре (по сравнению с конденсатом) и т. п.;

- уменьшение теплового сопротивления и тепловой емкости защитного чехла в результате выбора его материала и толщины;
- уменьшение постоянной времени воздушной прослойки за счет применения наполнителей (жидкость, металлическая стружка); у термоэлектрических преобразователей (термопар) рабочий спай припаивается к защитному чехлу;
- выбор типа первичного преобразователя; например, при выборе термометра сопротивления, термопары или манометрического термометра необходимо учитывать, что наименьшей инерционностью обладает термопара в малоинерционном исполнении, наибольшей – манометрический термометр.

### 3.5. Регулирование рН.

Системы регулирования рН можно подразделить на два типа, в зависимости от требуемой точности регулирования. Если скорость изменения рН невелика, а допустимые пределы ее колебаний достаточно широки, применяют позиционные системы регулирования, поддерживающие рН в заданных пределах:  $pH_n \leq pH \leq pH_v$ . Ко второму типу относятся системы, обеспечивающие регулирование процессов, в которых требуется точное поддержание рН на заданном значении (например, в процессах нейтрализации). Для их регулирования используют непрерывные ПИ– или ПИД–регуляторы.

Общей особенностью объектов при регулировании рН является нелинейность их статических характеристик, связанная с нелинейной зависимостью рН от расходов реагентов. На рис. 3.11 показана кривая титрования, характеризующая зависимость рН от расхода кислоты  $G_1$ . Для различных заданных значений рН на этой кривой можно выделить три характерных участка: первый (средний), относящийся к почти нейтральным средам, близок к линейному и характеризуется очень большим коэффициентом усиления; второй и третий участки, относящиеся к сильно щелочным или кислым средам, обладают наибольшей кривизной.

На первом участке объект по своей статической характеристике приближается к релейному элементу. Практически это означает, что при расчете линейной АСР коэффициент усиления регулятора настолько мал, что выходит за пределы рабочих настроек промышленных регуляторов. Так как собственно реакция нейтрализации проходит практически мгновенно, динамические характеристики аппаратов определяются процессом смешения и в аппаратах с перемешивающими устройствами достаточно точно описываются дифференциальными урав-

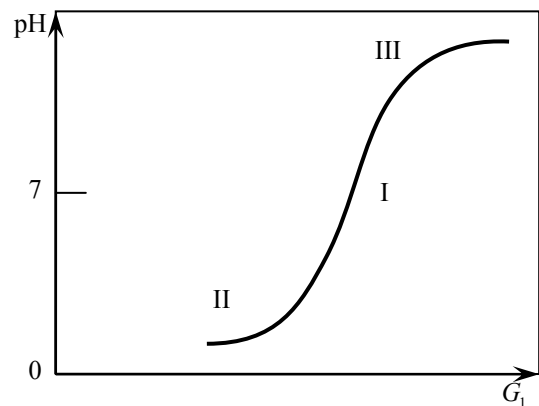
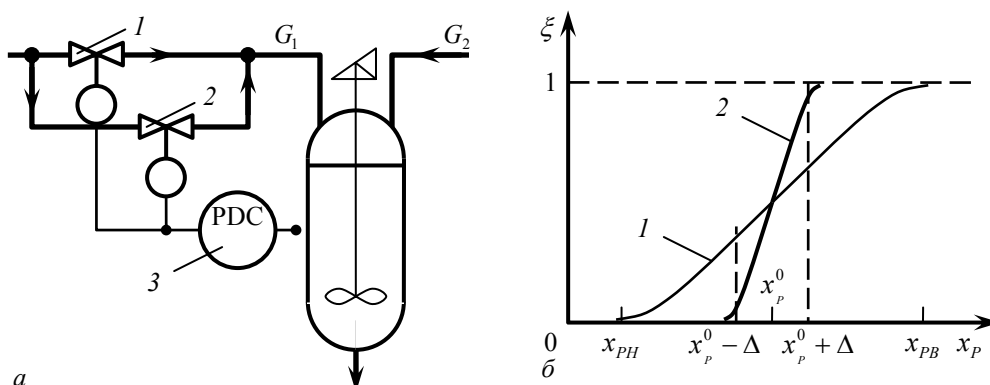


Рис. 3.11. Зависимость величины рН от расхода реагента.



нениями 1-го порядка с запаздыванием. При этом, чем меньше постоянная времени аппарата, тем сложнее обеспечить устойчивое регулирование процесса, так как начинают сказываться инерционность приборов и регулятора и запаздывание в импульсных линиях. Для обеспечения устойчивого регулирования рН применяют специальные системы. На рис. 3.12, а показан пример системы регулирования рН с двумя регулирующими клапанами.



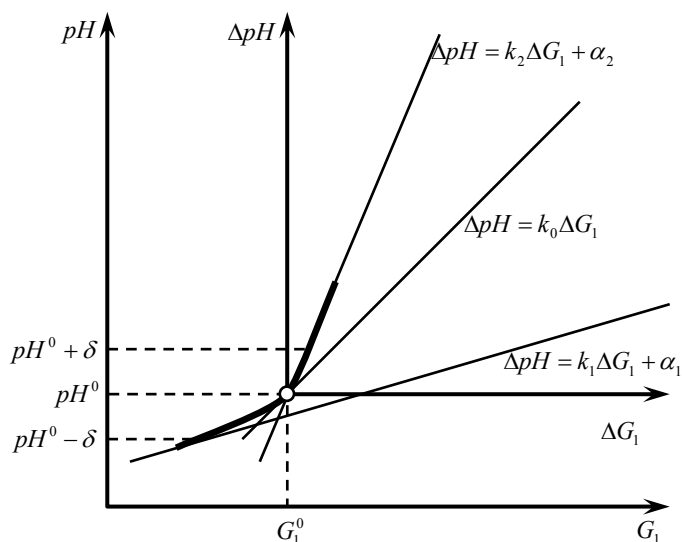
**Рис. 3.12.** Пример системы регулирования рН:

а – функциональная схема; б – статические характеристики клапанов (1, 2 – регулирующий клапан; 3 – регулятор рН).

Клапан 1, обладающий большим условным диаметром, служит для грубого регулирования расхода и настроен на максимальный диапазон изменения выходного сигнала регулятора  $[x_{PH}, x_{PB}]$  (рис. 3.12, б, кривая 1). Клапан 2, служащий для точного регулирования, рассчитан на меньшую пропускную способность и настроен таким образом, что при  $x_p = x_p^0 + \Delta$  он полностью открыт, а при  $x_p = x_p^0 - \Delta$  – полностью закрыт (кривая 2). Таким образом, при незначительном отклонении рН от  $pH^0$ , когда  $x_p^0 - \Delta \leq x_p \leq x_p^0 + \Delta$ , степень открытия клапана 1 практически не изменяется, и регулирование ведется клапаном 2. Если  $|x_p - x_p^0|$ , клапан 2 остается в крайнем положении, и регулирование осуществляется клапаном 1.

На втором и третьем участках статической характеристики (рис. 3.12, б) ее линейная аппроксимация справедлива лишь в очень узком диапазоне изменения рН, и в реальных условиях ошибка регулирования за счет линеаризации может оказаться недопустимо большой. В этом случае более точные результаты дает кусочно-линейная аппроксимация (рис. 3.13), при которой линеаризованный объект имеет переменный коэффициент усиления.

На рис. 3.14 приведена структурная схема такой АСР. В зависимости от рассогласования рН, включается в работу один из регуляторов, настроенный на соответствующий коэффициент усиления объекта.



**Рис. 3.13.** Кусочно-линейная аппроксимация статической характеристики объекта при регулировании рН.

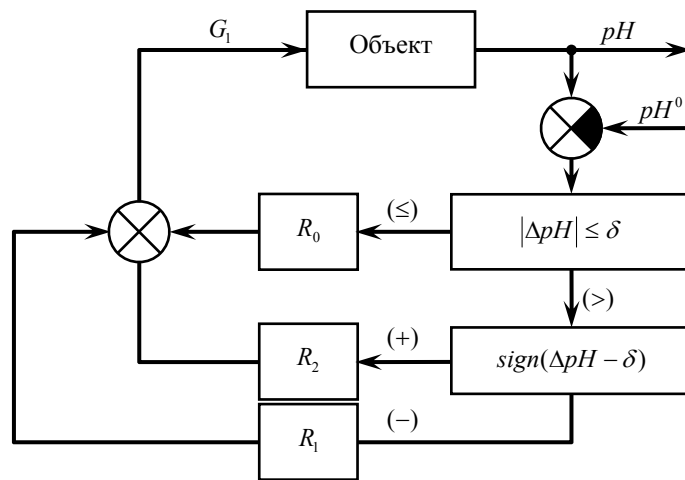


Рис. 3.14. Структурная схема системы регулирования рН с двумя регуляторами.

### 3.6. Регулирование параметров состава и качества

В процессах химической технологии большую роль играет точное поддержание качественных параметров продуктов (концентрация определенного вещества в потоке и т.п.). Эти параметры сложно измерить. В некоторых случаях для измерения состава используют хроматографы, которые выдают результаты измерения в дискретные моменты времени (по продолжительности цикла работы хроматографа).

Дискретность измерения может привести к значительным дополнительным запаздываниям и снижению динамической точности регулирования. Чтобы уменьшить нежелательное влияние задержки измерения, используют модель связи качества продукта с переменными, которые измеряют непрерывно. Эта модель может быть достаточно простой; коэффициенты модели уточняют, сравнивая рассчитанное по ней и найденное в результате очередного анализа значение качественного параметра. Таким образом, одним из рациональных способов регулирования качества является регулирование по косвенному вычисляемому показателю с уточнением алгоритма его расчета по данным прямых анализов. В промежутках между измерениями показатель качества продукта может быть рассчитан экстраполяцией ранее измеренных значений.

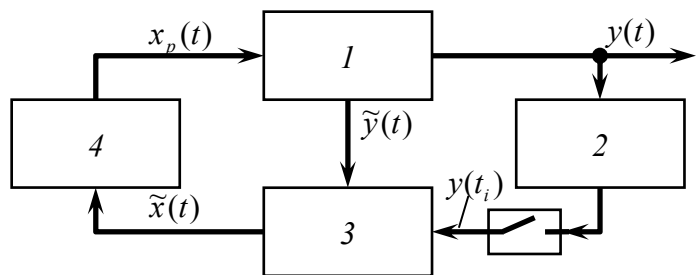


Рис. 3.15. Блок-схема АСР параметра качества продукта:

1 – объект; 2 –анализатор качества; 3 – вычислительное устройство; 4 – регулятор

Блок-схема системы регулирования параметра качества продукта показана на рис. 3.15.

Вычислительное устройство в общем случае непрерывно рассчитывает оценку показателя качества  $\tilde{x}(t)$  по формуле

$$\tilde{x}(t) = F_1(\tilde{y}(t)) + F_2((t - t_i), y(t_i), y(t_{i-1}), \dots),$$

в которой первое слагаемое отражает зависимость  $\tilde{x}$  от непрерывно измеряемых переменных процесса или величин, динамически с ними связанных, например производных, а второе – от выхода экстраполирующего фильтра.

Для повышения точности регулирования состава и качества применяют приборы с устройством автоматической калибровки. В этом случае система управления производит периодическую калибровку анализаторов состава, корректируя их характеристики.

## **Автоматизация основных процессов химической технологии**

### **4. Автоматизация гидромеханических процессов**

#### **4.1. Автоматизация процессов перемещения жидкостей и газов.**

Процессы перемещения жидкостей и газов и процессы разделения и очистки неоднородных систем относят к **гидромеханическим процессам**.

В химической промышленности для транспортировки жидкостей по трубопроводам наиболее часто применяют:

1. Центробежные насосы.
2. Поршневые насосы.

Для перемещения газов применяют поршневые компрессоры.

Регулирование работы насосов и компрессоров обычно состоит **в поддержании их заданной производительности**.