

**Ю. М. ГОЛДОБИН
Е. Ю. ПАВЛЮК**

АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Учебное пособие

Министерство образования и науки Российской Федерации
Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

Ю. М. Голдобин
Е. Ю. Павлюк

АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Учебное пособие

Рекомендовано методическим советом
Уральского федерального университета для студентов вуза,
обучающихся по направлению подготовки
13.03.01 — Теплоэнергетика и теплотехника

Екатеринбург
УрФУ
2017

УДК 621.311.22:681.5(075.8)

ББК 31.37-5я73+32.965я73

Г60

Рецензенты: С. М. Шанчуров, завкафедрой «Энергетика» УГЛТУ, д-р техн. наук, профессор; В. М. Липлавк, директор ООО «УралЭко-Автоматика»

Научный редактор — д-р техн. наук, проф. В. А. Мунц

Голдобин, Ю. М.

Г60 Автоматизация теплоэнергетических установок : учеб. пособие / Ю. М. Голдобин, Е. Ю. Павлюк. — Екатеринбург : УрФУ, 2017. — 186 с.

ISBN 978-5-321-02542-0

В пособии приводятся краткие сведения о структуре средств автоматизации, об основных понятиях теории автоматического регулирования. На основе анализа технологии работы и протекания теплофизических процессов рассмотрены системы автоматического регулирования и защиты различных теплофизических установок. Рассмотрены основные типы регулирующих органов. Приведены основные условные обозначения для построения функциональных схем автоматизации.

Библиогр: 10 назв. Табл. 3. Рис. 99. Прил. 1.

УДК 621.311.22:681.5(075.8)

ББК 31.37-5я73+32.965я73

ISBN 978-5-321-02542-0

© Уральский федеральный университет, 2017

© Голдобин Ю. М.,
Павлюк Е. Ю., 2017

ВВЕДЕНИЕ

Основу современной энергетики составляют крупные тепловые электростанции (ТЭС), производственные и отопительные котельные, системы теплоснабжения производственных, административных и жилых зданий, системы воздухообеспечения, производства кислорода для нужд предприятий, холодильные установки различного назначения, сушильные установки и т. п.

Трудоемкие процессы, связанные с производством и распределением тепловой и электрической энергии как на современных ТЭС, так и в других отраслях промышленной теплоэнергетики, в основном механизированы, и труд оператора состоит в том, чтобы управлять машинами, механизмами и установками (перемещать регулирующие органы, включать или отключать оборудование и т. п.) и наблюдать за их работой непосредственно или по контрольно-измерительным приборам.

Однако механизация (даже полная) круглосуточно работающего энергетического оборудования не избавляет оператора от утомительного и однообразного труда по управлению основным и вспомогательным оборудованием и не гарантирует их надежной и экономичной работы даже при высокой квалификации эксплуатационного персонала. Это обусловило активное развитие автоматизации в энергетике.

В 30–40-е гг. XX в. автоматизация теплового оборудования на ТЭС и в котельных проводилась в основном на базе автоматических регуляторов электромеханической системы, в которой измерительные, командно-усилительные и исполнительные устройства представляли собой единую конструкцию. Жесткая структура такого регулятора, а также наличие большого числа подвижных частей и электрических контактов в цепях управления исполнительными механизмами препятствовали созданию надежных автоматических систем регулирования и решению сложных задач управления.

В 50-е гг. XX в. в энергетике благодаря развитию приборостроения и отраслей промышленности, выпускающих электронную технику и малогабаритную аппаратуру управления, стали широко применяться автоматические регуляторы тепловых процессов нового типа, состоящие из отдельного первичного прибора с выходным электрическим сигналом, электронного регулирующего прибора и отдельно расположенного исполнительного механизма с независимым дистанционным управлением. Это позволило разместить части регулятора отдельно в соответствии с их функциональным назначением: первичный прибор и исполнительный механизм на объекте, а регулирующий прибор и органы управления на оперативном щите.

В 60–70-е гг. XX в. происходит новый качественный скачок в энергетике. Единичные мощности агрегатов растут, количество контролируемых параметров также растет, достигая 500–2000 точек измерений. Разработанные ранее технические средства автоматизации в этих условиях малопригодны. Появились датчики и преобразователи с нормированными выходными сигналами. Происходит бурное развитие средств вычислительной техники (электронно-вычислительные машины и микропроцессорные средства). Вычислительные машины стали использовать для сбора и переработки информации о работе промышленных объектов. С помощью вычислительных машин оказалось возможным решение задач по управлению и выдаче результатов в виде советов оператору или сигналов — команд исключительным механизмам. В результате часть функций по управлению и контролю сложными технологическими процессами стала передаваться вычислительной машине, в том числе массовый контроль и сигнализация, расчет технико-экономических показателей отдельных агрегатов и производства в целом, оптимизация некоторых режимов работы оборудования и др.

Наряду с цифровой вычислительной машиной, продолжают широко использоваться системы индивидуального контроля важнейших параметров, автоматическое регулирование отдельных участков технологического процесса, автономные системы дистанционного управления и автоматических защит энергетического оборудования.

Таким образом постепенно сложились автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУ ТП).

Каждая АСУ ТП, независимо от вида технологического процесса, которым она управляет, представляет собой систему «человек — машина», выполняющую сбор и переработку информации для выработ-

ки и реализации управляющих воздействий на технологический объект управления в соответствии с принятым критерием управления. Оперативно-диспетчерское управление энергооборудованием и контроль наиболее ответственных параметров в АСУ ТП остаются за оперативным персоналом, эффективно использующим технические средства автоматизации.

Автоматизация теплоэнергетического оборудования осуществляется с помощью средств (системы управления), выполняющих следующие функции: автоматического контроля (измерения) текущих значений параметров технологического процесса; технологической сигнализации о состоянии основного и вспомогательного оборудования; автоматической защиты основного и вспомогательного оборудования от возможных повреждений в процессе эксплуатации; дистанционного управления машинами и механизмами на расстоянии; автоматического непрерывного регулирования технологических процессов и управления основными и вспомогательными механизмами; автоматического дискретного управления включением или отключением регуляторов, машин, механизмов и установок в заданной последовательности. Перечисленные функции выполняются подсистемами управления.

Человек — оператор и подчиненные ему подсистемы должны управлять технологическими процессами и поддерживать такие значения технологических параметров, которые обеспечивают максимально возможные технико-экономические показатели установок. Эти подсистемы, подчиненные оператору, при использовании вычислительных машин образуют автоматизированную систему управления технологическими процессами объектов, например, АСУ ТП энергоблока на тепловой электростанции, АСУ ТП парового (водогрейного) котла, АСУ ТП пароводогрейной котельной и т. п.

ГЛАВА 1. Основные понятия теории автоматического управления

1.1. Структура средств автоматизации

Автоматизацией механизированного производства называют управление машинами, механизмами и установками и контроль за их работой с помощью специальных устройств (от простейших автоматов до современных управляющих вычислительных машин) без участия человека или при ограниченном его участии. Фактически под автоматизацией следует понимать правильное безаварийное ведение того или иного технологического процесса без участия персонала (или при его ограниченном участии).

Выполнение автоматизации того или иного технологического процесса на действующем оборудовании подразумевает наличие всех необходимых средств автоматизации, образующих определенную структуру.

Структура средств автоматизации включает в себя:

- 1) автоматический контроль всех необходимых параметров (информационный контроль);
- 2) технологическую сигнализацию;
- 3) автоматические защиты;
- 4) автоматические блокировки;
- 5) дистанционное управление;
- 6) автоматическое управление (автоматическое регулирование).

Автоматический контроль параметров подразумевает измерение тех величин, которые характеризуют правильное ведение технологического процесса, а также тех величин, которые необходимо регули-

ровать. В теплоэнергетике к последним (параметрам) обычно относится давление различных сред, их расход, уровень жидких и сыпучих сред, температура сред, концентрация каких-либо компонентов в жидкостях или газах и т. п. Для измерения этих параметров выпускаются различные контрольно-измерительные приборы.

Контрольно-измерительные приборы могут быть установлены по месту (на трубопроводах, у оборудования и т. п.) и на щитах контроля и управления, которые для удобства наблюдения за ходом процесса обычно выносятся на расстояние от работающего оборудования. Основная масса приборов выносятся на щиты и называется вторичными измерительными приборами. Первичными приборами являются датчики для измерения параметров с преобразователями различного типа для передачи показаний на расстояние (к вторичным измерительным приборам и регуляторам).

Датчики обычно имеют в своем составе чувствительный элемент и один или несколько преобразователей (рис. 1.1). Чувствительные элементы отличаются в зависимости от измеряемого параметра. Преобразователи переводят сигналы от чувствительного элемента в вид энергии (обычно электрической), удобной для дистанционной передачи показаний.

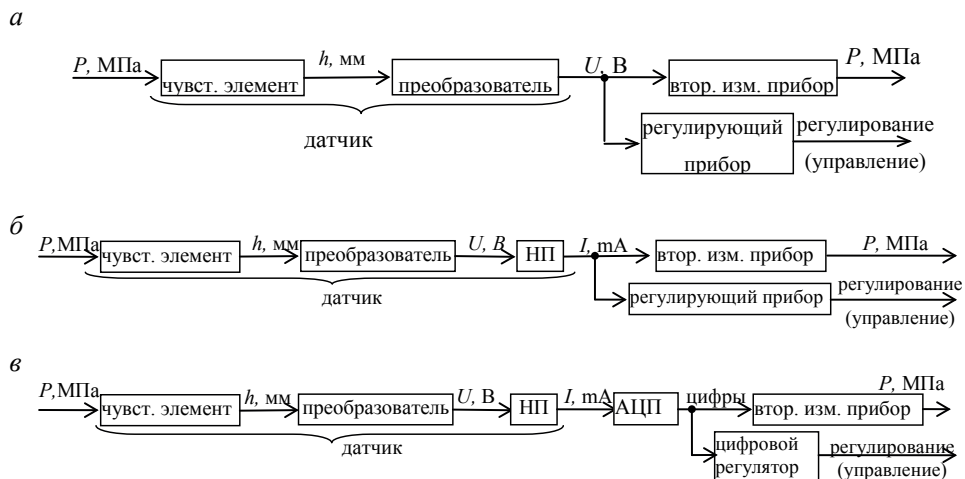


Рис. 1.1. Структурные схемы датчика давления:

a — с одним преобразователем; *б* — с двумя; *в* — с тремя:

P — давление; h — перемещение; U — напряжение (электрический сигнал)

В настоящее время выпускаются датчики с унифицированными нормированными выходными сигналами. В качестве унифицированных сигналов чаще используются токовые сигналы (0–5 мА; 4–20 мА) или по напряжению. В таком случае в структурной схеме датчика появляется еще один преобразователь (рис. 1.1, б), который называют нормирующим (НП — нормирующий преобразователь).

При использовании цифровых измерительных приборов необходимо унифицированные аналоговые сигналы переводить в цифровые. На схеме (рис. 1.1, в) появляется еще один преобразователь — аналого-цифровой (АЦП).

Нормирующие АЦП могут быть отдельными устройствами, могут быть встроены во вторичные измерительные приборы, могут быть встроены в датчики.

Измерение давления. В качестве чувствительного элемента используются одновитковые и многovitковые трубчатые пружины, мембраны, сильфоны, которые переводят сигнал по давлению в перемещение. Для преобразования сигналов перемещения h в электрический вид используются реостатные, индукционные, дифференциально-трансформаторные, ферродинамические, тензометрические преобразователи и т. п.

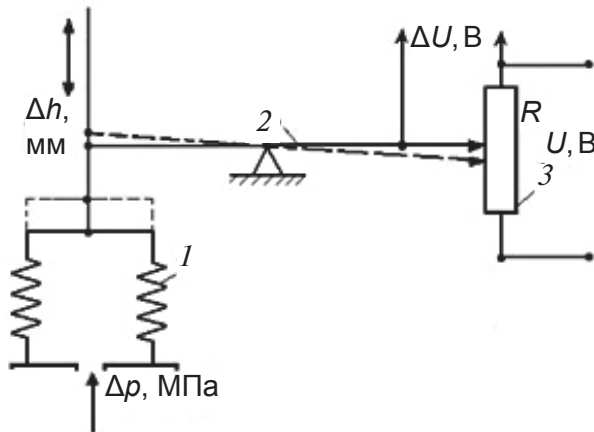


Рис. 1.2. Схема построения датчика давления:

1 — сильфон (чувствительный элемент); 2 — рычаг преобразователя;
3 — реостатный преобразователь (2 и 3 — преобразователь); Δp — диапазон изменения давления; Δh — диапазон перемещений сильфона; ΔU — диапазон изменений выходного электрического сигнала

Пример построения датчика давления с сильфоном в качестве чувствительного элемента показан на рис. 1.2.

Аналогично строятся датчики для измерения напоров и разрежений.

Измерение расходов. Существуют различные способы измерения расходов жидкостей: по перепаду давления на диафрагме, вихревые расходомеры, ультразвуковые, электродинамические и т. п.

До сих пор наиболее распространенным и надежным способом измерения является измерение расходов газов и жидкостей с помощью диафрагм, установленных в трубопроводы. Расчет массовых расходов удобно производить по формулам

$$Q = K \sqrt{\rho \Delta p_d}, \quad (1.1)$$

$$Q = K' \sqrt{\Delta p_d}, \quad (1.1a)$$

где K, K' — константы; ρ — плотность среды; Δp_d — перепад давления на диафрагме.

Формула (1.1a) позволяет рассчитывать расходы только по перепаду давления Δp_d , если давление и температура среды равны тем значениям, которые были заданы при расчете диафрагмы. Если давление и температура среды будут отличаться от расчетных значений, то необходимо вводить поправку на изменение плотности среды (формула (1.1)). В настоящее время появилась возможность точного измерения расхода при переменных давлениях и температурах сред по формуле (1.1) при цифровых измерениях. В формулу вводится выражение для расчета плотности (газа, пара, жидкости).

Датчиками для измерения перепада давления служат дифференциальные манометры ДМ, «Сапфир 22-ДД», «Сапфир 22-ДР», «Метран» и др.

Измерение уровня жидкости. Для измерения уровня жидкостей обычно используется перепад давления, создаваемый разностью столбов жидкостей в импульсных линиях, который измеряется датчиками перепада давления. Один уровень делается постоянным, а другой — переменным (уровень воды в барабане парового котла, в деаэраторах, в баках). Существуют и другие методы измерения уровня жидкости, которые используются на конкретном оборудовании.

Измерение температур. Для измерения температур с передачей показаний на расстояние чаще всего используются термопары и термометры сопротивления.

Основная идея измерения при помощи термопары состоит в использовании эффекта Зеебека. Если одни концы двух разнородных материалов (проводов) сварить и опустить в горячую среду с температурой t_r , то на других концах проводов, находящихся при температуре окружающей среды t_x , появится термоЭДС E пропорциональная разности температур t_r и t_x

$$E = k(t_r - t_x),$$

где k — коэффициент пропорциональности.

В теплоэнергетике используются чаще всего три типа термопар:

- 1) термопара «хромель—алюмель» (ТХА). Диапазон длительного измерения температур 0—800 °С;
- 2) термопара «хромель—копель» (ТХК). Диапазон длительного измерения температур 0—600 °С;
- 3) термопара «платинородий—платина» (ТПП). Диапазон измерения температур 0—1400 °С.

Вторичными приборами служат милливольтметры и автоматические потенциометры.

Для измерения температур используется зависимость изменения электрического сопротивления проводника от температуры (термометры сопротивления)

$$R_t = R_0(1 + \alpha t),$$

где R_0 — сопротивление проводника при постоянной температуре (например, 0 °С); α — коэффициент, учитывающий изменение сопротивления проводника при изменении температуры на 1 °С; t — температура среды, °С.

В теплоэнергетике нашли применение два типа термометров сопротивления:

- 1) термометр сопротивления медный (ТСМ), который используется в диапазоне изменения температур 0—180 °С;
- 2) термометр сопротивления платиновый (ТСП), в диапазоне температур 0—500 °С.

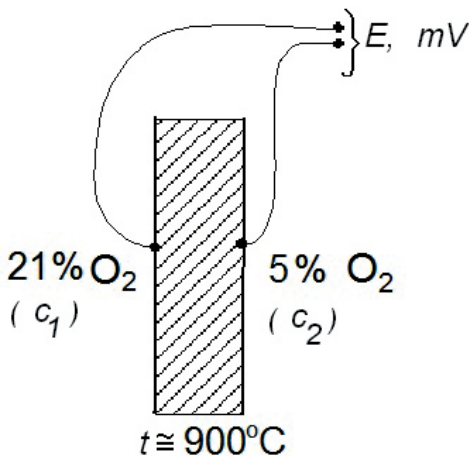
Вторичными приборами служат логометры и автоматические мосты.

Измерение концентраций. Датчиками для измерения концентраций служат специально создаваемые устройства, которые используются только для того физико-химического процесса, который заложен в метод измерения. Какого-либо единого способа измерения концентраций нет.

В котельной технике обычно необходимо измерять концентрацию солей в котловой воде и концентрацию кислорода в дымовых газах.

Работа датчика концентрации солей в котловой воде (солесодержание котловой воды) основана на изменении электропроводимости воды в зависимости от содержания солей.

Для измерения концентрации свободного кислорода в дымовых газах в настоящее время используется электрохимический датчик (ЭХД). Принцип его работы состоит в том, что при разных концентрациях измеряемой среды на поверхностях стенки датчика, находящегося при температуре примерно $900\text{ }^{\circ}\text{C}$, возникает разность потенциалов, которая пропорциональна разности концентраций (рис. 1.3).



$$E = k(c_1 - c_2),$$

где k — коэффициент пропорциональности

Рис. 1.3. Принцип измерения концентрации кислорода в дымовых газах

Значение термоЭДС E достаточно большое и может быть использовано для измерения и регулирования.

Контрольно-измерительные приборы выпускаются с разными функциями, которые они выполняют:

- 1) показывающие (имеют шкалу и стрелку);
- 2) регистрирующие (дополнительно записывают на диаграмму);
- 3) интегрирующие (имеют счетчик количества протекающей среды);

- 4) сигнализирующие (используются в схемах защит и сигнализации);
- 5) регулирующие (используются для целей регулирования каких-либо параметров).

Технологическая сигнализация служит для оповещения персонала о происшедших изменениях в режимах работы оборудования. Она подразделяется на основные виды:

- 1) контрольную;
- 2) предупредительную;
- 3) аварийную.

Контрольная сигнализация оповещает персонал о включениях, отключениях или переключениях в работе того или иного оборудования. Сигнализация световая (лампы зеленого, красного цвета). По сигнализации судят о том, включено оборудование или отключено. Контрольная сигнализация всегда сопровождает действия дистанционного управления.

Предупредительная сигнализация предупреждает персонал о возникших отклонениях в режиме работы оборудования, которые могут привести к аварии. Она срабатывает обычно по отклонению параметров до 1-го допустимого предела. Сигнализация может быть световая и звуковая. Световая: зажигается световое табло предупредительной сигнализации на щите КИПиА с высвечиванием параметра, который стал причиной срабатывания сигнализации. Звуковая — электрический звонок. При срабатывании этой сигнализации персоналу дается время для принятия мер по восстановлению нормального технологического режима работы. Примером предупредительной сигнализации служит ее срабатывание по отклонению уровня воды в барабане котла до 1-го допустимого предела ($\Delta H_6 = (\pm 70)$ мм H_2O от нормального).

Аварийная сигнализация оповещает персонал о том, что сработала автоматическая аварийная защита, отключившая основное оборудование. Эта сигнализация также световая и звуковая. Световая: зажигается световое табло аварийной сигнализации с указанием причины срабатывания защиты. Звуковая: включается электрический звонок громкого боя, гудок или сирена, т. е. звук, отличный от срабатывания предупредительной сигнализации.

Автоматические защиты предназначены для защиты работающего оборудования от возникновения аварий. Они подразделяются на два вида:

- 1) локальные (или местные) защиты;
- 2) основные (или аварийные) защиты,

Локальные защиты включают, отключают или переключают часть работающего оборудования при отклонении некоторых параметров за допустимые пределы. Основное оборудование продолжает работать. При восстановлении параметра локальные защиты отключаются.

Примеры локальных защит:

- 1) установка предохранительных клапанов по давлению пара на барабанах котлов и за пароперегревателем. При повышении давления сверх допустимого предохранительные клапаны открываются, давление в котле сбрасывается до нормального, клапаны закрываются. Котел (основное оборудование) продолжает работать;
- 2) при повышении уровня воды в барабанах котла до 2-го допустимого предела ($\Delta H_6 > 100 \dots 120$ мм H_2O) локальная защита открывает аварийный слив из барабана котла. При восстановлении уровня воды аварийный слив закрывается. Котел продолжает работать;
- 3) при выходе из строя одного из рабочих питательных насосов (падает давление воды на нагнетании) локальная защита включает резервный питательный насос и после выхода его на рабочий режим отключает неисправный (АВР насосов);
- 4) перевод котла на 50 % нагрузки при выходе из строя одного из двух работающих вентиляторов или дымососов.

Основные (аварийные) защиты отключают основное оборудование, предотвращая развитие аварий. Задачей срабатывания аварийной защиты является отключение подачи энергии на основное оборудование (электроэнергии, топлива и т. п.). Примером срабатывания аварийной защиты является отключение парового котла при выходе некоторых параметров за допустимые пределы (давление газа на горелки, понижение-повышение уровня воды в барабанах котла, погасании факела в топке и т. п.). Защита отключает подачу топлива. Срабатывание аварийной защиты всегда сопровождается срабатыванием аварийной сигнализации.

Параметры, по которым срабатывает предупредительная сигнализация или защита, определяются для конкретного оборудования согласно технологии его работы.

Автоматические блокировки предназначены для защиты оборудования от неправильных действий персонала. Они подразделяются на два вида:

- 1) запречно-разрешающие блокировки;
- 2) аварийные блокировки.

Запречно-разрешающие блокировки предназначены для защиты оборудования при ручных запусках всего оборудования в работу и ручных отключениях. Ручные включения и отключения оборудования должны производиться в правильной технологической последовательности. Нарушение этой последовательности может привести к неприятным последствиям, в том числе к авариям. Если включения производятся правильно, то блокировки разрешают проводить следующий шаг включения (выключения), а если неправильно, то блокировка запрещает (не дает) производить следующий шаг включения (отключения).

Примером запречно-разрешающих блокировок может служить включение в работу системы топливоподачи на котлах, работающих на твердом топливе. Пусть от угольного склада до угольных бункеров котлов существует три ленточных транспортера (1, 2 и 3). Правильный порядок включения: 1) включить третий транспортер, раздающий уголь по бункерам котлов; 2) включить второй (промежуточный) транспортер, подающий уголь после дробилки на третий транспортер; 3) включить первый транспортер, подающий уголь с угольного склада.

При нарушении порядка включения транспортеров, оператор не сможет этого сделать, иначе может быть завал углем системы топливоподачи (авария).

Отключение работающей системы топливоподачи должно производиться в обратном порядке.

Аварийные блокировки производят автоматически (без участия персонала) все необходимые действия по полному останову оборудования после срабатывания аварийной защиты. Примером автоматических блокировок может служить останов барабанного парового котла с пароперегревателем, работающего на общую паровую магистраль.

Основная (аварийная) защита отключает подачу топлива и воздуха (вентилятор). Аварийные блокировки закрывают главную паровую задвижку, отключая котел от паровой магистрали; открывают продувку пароперегревателя, закрывают впрыск конденсата на пароохладитель, прикрывают подачу питательной воды, закрывают подачу газа на горелки и т. п.

Дистанционное управление подразумевает ручное управление на расстоянии различными механизмами (насосами, вентиляторами, дымососами, электрофицированными задвижками и т. п.). Дистан-

ционное управление используется и как резерв при временном выходе из строя автоматического управления (автоматического регулирования).

Действие дистанционного управления всегда сопровождается срабатыванием контрольной сигнализации.

Под автоматическим управлением понимают ведение сложного технологического процесса без участия персонала, основной задачей которого является выработка и реализация таких решений, которые при данных условиях обеспечивают наиболее эффективное достижение поставленной цели. Целями управления технологическим процессом могут быть: поддержание значения некоторой физической величины с заданной точностью; изменение величины по определенной наперед заданной программе; оптимальное значение величины или некоторого обобщающего критерия; максимальная производительность, минимальные затраты энергии на выработку какого-либо продукта и т. п.

В простых случаях, когда требуется поддерживать параметр при каком-либо постоянном значении или изменять его по какому-либо закону, автоматическое управление называют автоматическим регулированием.

1.2. Теория автоматического управления (регулирования)

1.2.1. Общие положения

Любой агрегат, аппарат или устройство, в котором требуется что-либо регулировать, в автоматике называется объектом регулирования (объект управления). Тот параметр, который требуется регулировать, называют регулируемым параметром. То значение параметра, которое необходимо поддерживать постоянным или изменять по какому-либо закону, называют заданным значением.

В любом объекте регулирования имеется приток среды или энергии в объект и ее расход из объекта. Расход среды или энергии из объекта поступает потребителю, который может изменять его по своему усмотрению. Те устройства, с помощью которых можно изменять расходы

сред, называют регулирующими органами (управляющими органами) — это могут быть регулирующие клапаны, заслонки, направляющие аппараты, питатели и т. п.

Любой объект регулирования может находиться в двух режимах работы: статическом и динамическом.

В статическом (установившемся) режиме приток среды или энергии в объект равен ее расходу из объекта. В объекте никаких изменений не происходит, регулируемый параметр не изменяется, он постоянен. Его обычно принимают за заданное значение. Регулирования не требуется.

В динамическом (переходном, неустановившемся) режиме приток среды или энергии в объект не равен ее расходу из объекта. В объекте начинаются изменения, параметры начинают изменяться. В этом режиме требуется регулирование. Причиной возникновения небаланса между притоком среды или энергии в объект и ее расходом из объекта в основном является потребитель (внешнее возмущение) или нестабильность параметров входных потоков (внутренние возмущения).

Рассмотрим эти понятия на примере бака с водой как объекта регулирования уровня воды (рис. 1.4):

- 1) в статическом режиме $Q_1 = Q_2$; $\Delta Q = Q_1 - Q_2 = 0$; $H = \text{const} = H_0$;
- 2) в динамическом режиме $Q_1 \neq Q_2$; $\pm \Delta Q = Q_1 - Q_2$; H изменяется.

При регулировании рассматриваются отклонения уровня от заданного значения $\pm \Delta H = H_0 - H$.

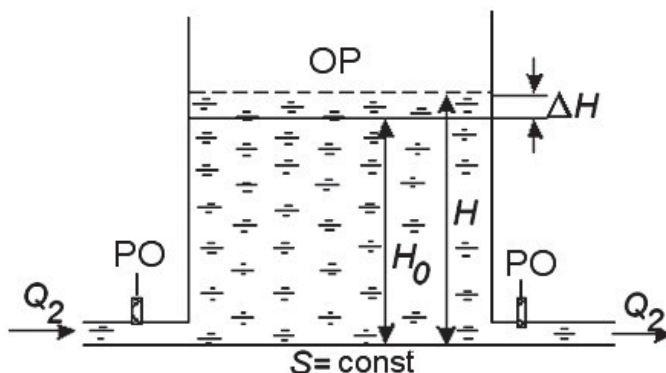


Рис. 1.4. Объект регулирования уровня воды (бак):

ОР — объект регулирования; РО — регулирующий орган; Q_1 — приток среды; Q_2 — расход среды; H — уровень воды в баке; H_0 — заданное значение уровня; S — сечение бака

При создании системы автоматического регулирования необходимо: измерить уровень H , сравнить его с заданным значением H_0 ; получить сигнал рассогласования $\pm\Delta H$, усилить этот сигнал, послать его на исполнительный механизм, который будет перемещать регулирующий орган. Поскольку потребитель изменяет расход Q_2 , создавая разбаланс расходов $\pm\Delta Q$, исполнительный механизм должен управлять регулирующим органом на притоке, изменяя расход Q_1 в сторону восстановления баланса.

При выполнении вышеперечисленных задач получают автоматический регулятор, который будет состоять из следующих основных элементов:

- 1) измерительного устройства (датчик) (ИУ);
- 2) элемента сравнения (ЭС);
- 3) управляющего устройства (усилитель) (УУ);
- 4) исполнительного механизма (ИМ).

Структурная схема автоматического регулятора получается путем объединения этих устройств в единую цепочку по последовательному прохождению сигналов (рис. 1.5).

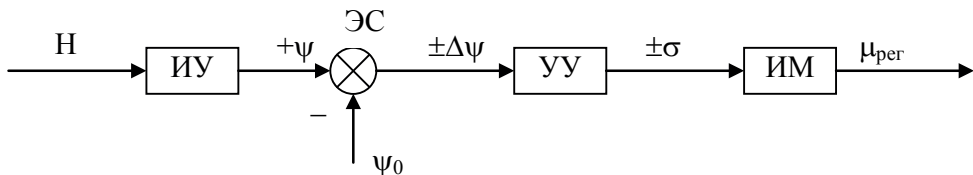


Рис. 1.5. Структурная схема регулятора:

H — уровень воды в баке; ψ — электрическое представление уровня;
 ψ_0 — электрическое представление заданного значения уровня (H_0); $\Delta\psi$ — сигнал рассогласования, $\pm\Delta\psi = (\psi - \psi_0)$; σ — управляющий усиленный сигнал;
 $\mu_{\text{рег}}$ — регулирующее (управляющее) воздействие на регулируемый орган

Под системой автоматического регулирования понимают совокупность объекта регулирования и автоматического регулятора.

Входной величиной объекта регулирования является приток среды, а выходной величиной — регулируемый параметр (H). Влияние потребителя на объект регулирования (изменение Q_2) обозначим буквой λ , а влияние изменения притока Q_1 обозначим буквой $\mu_{\text{об}}$. Объект регулирования представляется на структурной схеме в следующем виде (рис. 1.6).

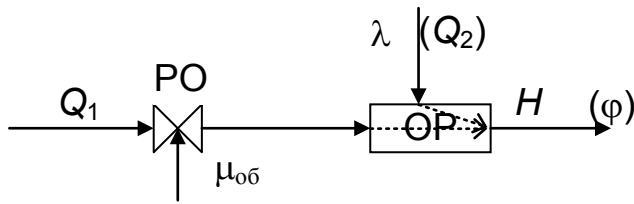


Рис. 1.6. Структурная схема объекта регулирования:
 - - - - - влияние Q_1 и Q_2 на регулируемый параметр H

При рассмотрении объектов, в которых протекают другие физические процессы, регулируемым (выходным) параметром может быть температура, давление, расход, концентрация какого-либо вещества, тепловая нагрузка и т. п. Примерами таких объектов могут служить электрическая или газовая печь как объект регулирования температуры; бак с раствором солей как объект регулирования концентрации солей; воздушный раствор как объект регулирования давления воздуха, подаваемого потребителю; паровой котел как объект регулирования тепловой нагрузки и т. д. В общем случае рассматривают объект регулирования какого-либо выходного параметра φ , входное возмущение (изменения расхода Q_1) (на рис. 1.6 обозначен буквой $\mu_{об}$).

Объединение структурных схем объекта регулирования и регулятора позволяет получить структурную схему системы автоматического регулирования (САР) (рис. 1.7).

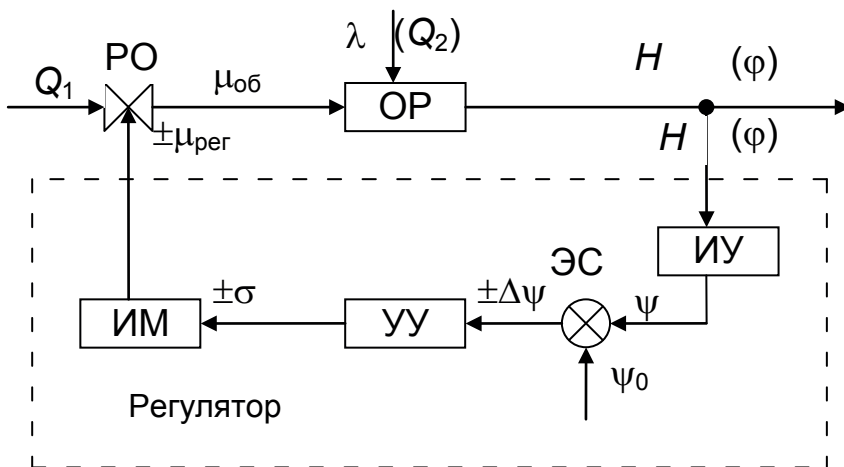


Рис. 1.7. Структурная схема САР

Эта схема фактически является общей для регулирования и других параметров (φ), под которыми кроме уровня можно понимать температуру, расход, давление, концентрацию и др.

Таким образом, смысл регулирования сводится к восстановлению баланса между Q_1 и Q_2 (т. е. $\Delta Q = Q_1 - Q_2$, ΔQ стремится к 0). При этом регулируемый параметр может установиться на заданном значении ψ_0 (H_0) или на каком-то новом значении. Это зависит от принятого закона регулирования.

Работа системы автоматического регулирования зависит от свойств объекта регулирования и выбранного закона регулирования.

1.2.2. Основные свойства теплоэнергетических объектов регулирования

Все многообразие тепловых объектов регулирования по различным параметрам (паровые и водогрейные котлы, печи, сушильные аппараты, системы теплоснабжения, теплообменники различного типа, компрессорные и кислородные установки и т. п.) можно свести к нескольким типам, если классифицировать их по свойствам и степени сложности.

При классификации по свойствам все объекты можно разделить на следующие виды:

- 1) статические объекты (объекты с самовыравниванием);
- 2) астатические объекты (объекты без самовыравнивания);
- 3) неустойчивые объекты (практически не используются).

Основными типами объектов в теплоэнергетике по свойствам являются статические и астатические.

При классификации по степени сложности объекты делятся:

- 1) на простые (или одноемкостные) объекты;
- 2) сложные (многоемкостные, или объекты с распределенной по длине емкостью).

Как простые, так и сложные объекты могут быть статическими или астатическими.

Одноемкостные объекты. Одноемкостные статические объекты характеризуются тем, что при нанесении возмущения на объект (или со стороны потребителя Q_2 , или со стороны притока Q_1) регулируемый параметр (уровень H) с течением времени устанавливается на новом значении. Причиной такого поведения параметра является то, что

параметр влияет на приток среды в объект и на ее расход. Это можно проследить опять же на примере бака с водой (см. рис. 1.4). При увеличении Q_1 уровень воды H увеличится, перепад давления на регулирующем органе на притоке уменьшится, что приводит к уменьшению Q_1 . Увеличение уровня H приведет к увеличению перепада давления на регулирующем органе со стороны расхода Q_2 , в результате чего увеличится Q_2 . С течением времени Q_1 станет равным Q_2 и уровень установится на новом значении.

Дифференциальное уравнение одноемкостного статического объекта по каналу «входное возмущение ($\Delta Q_1 \rightarrow \mu_{об}$) — выходной параметр ($\Delta \varphi \rightarrow \varphi$)» приводится к стандартному виду, принятому в автоматике,

$$T_{об} \frac{d\varphi}{dt} + \varphi = k_{об}^{\mu} \mu_{об}, \quad (1.2)$$

где $T_{об}$ — постоянная времени объекта; φ — выходной (регулируемый) параметр; $k_{об}^{\mu}$ — размерный коэффициент передачи объекта по входному возмущению $\mu_{об}$, если $\mu_{об}$ и φ — размерные величины; если φ и $\mu_{об}$ приведены к безразмерному виду, то $k_{об}^{\mu}$ — безразмерный коэффициент передачи; $\mu_{об}$ — входное возмущение.

Из уравнения (1.2) следует передаточная функция объекта по каналу «входное возмущение $\mu_{об}$ — выходная величина φ »

$$W_{об}^{\mu}(p) = \frac{\varphi(p)}{\mu_{об}(p)} = \frac{k_{об}^{\mu}}{T_{об}p + 1}.$$

Значения $T_{об}$, $k_{об}^{\mu}$ могут быть рассчитаны для конкретно рассматриваемого объекта. Они определяются из соотношения теплофизических и конструктивных величин, входящих в уравнения динамики объекта при рассмотрении необходимых балансов (энергии, массы, расходов и т. п.).

На практике при работе оборудования возмущение дают путем ступенчатого приоткрытия (или прикрытия) регулирующего органа. Такое возмущение называют однократным ступенчатым. Запись изменения параметра на регистрирующем измерительном приборе дает динамическую характеристику объекта, которую называют кривой разгона (разгонной характеристикой) (рис. 1.8).

Из кривой разгона получают параметры, которые характеризуют объект регулирования, — коэффициент усиления $k_{об}$ и постоянную времени $T_{об}$. Эти параметры необходимы для дальнейшего расчета работы системы регулирования.

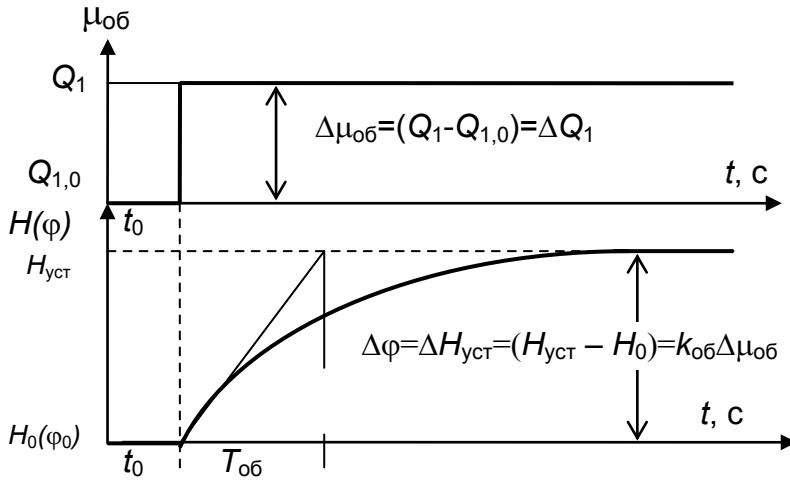


Рис. 1.8. Динамическая характеристика статического объекта:

Q_1 — новое значение расхода на притоке; $Q_{1,0}$ — приток среды в начальном статическом режиме работы; $\Delta\mu_{об}$ — величина возмущения; t_0 — момент времени нанесения возмущения; $H_{уст}$ — новое установившееся значение уровня; $k_{об}$ — коэффициент усиления (передачи) объекта регулирования; $T_{об}$ — постоянная времени объекта регулирования, с; t — текущее время, с

Одноемкостные астатические объекты характеризуются тем, что небаланс между притоком и расходом среды в объекте имеет постоянное значение ($\Delta Q = Q_1 - Q_2 = \text{const}$), следовательно, параметр H не влияет ни на приток Q_1 , ни на расход среды Q_2 (рис. 1.9).

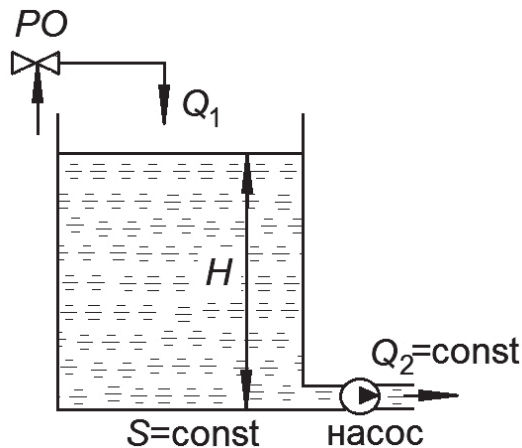


Рис. 1.9. Одноемкостный астатический объект

Кривая разгона при открытии регулирующего органа на притоке имеет вид прямой — линейная функция времени (рис. 1.10) при сечении бака $S = \text{const}$.

Единственным параметром, характеризующим поведение объекта, является коэффициент пропорциональности k' , имеющий размерность метры в секунду, если уровень H измерять в метрах.

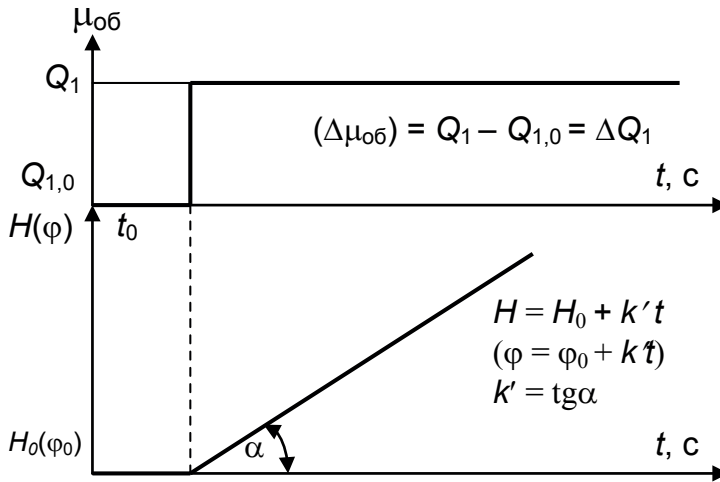


Рис. 1.10. Динамическая характеристика одноемкостного астатического объекта

Дифференциальное уравнение одноемкостного астатического объекта по каналу «входное возмущение $\mu_{об}$ — выходной параметр φ » будет

$$\frac{d\varphi}{dt} = k' \mu_{об} \quad (1.3)$$

или

$$T_{об} \frac{d\varphi}{dt} = \mu_{об}, \quad (1.3a)$$

где k' — коэффициент передачи, имеющий размерность скорости изменения параметра φ , деленного на размерность входного возмущения $\mu_{об}$.

При записи уравнения (1.3) в безразмерном виде коэффициент k' будет иметь размерность $[1/с]$, и уравнение может быть записано в другом виде (уравнение (1.3 а)), в котором $T_{об} \frac{1}{k'}$ — постоянная времени

астатического объекта, которая также используется в расчетах систем регулирования.

Многоемкостные (сложные) объекты. В многоемкостных объектах при нанесении возмущения регулируемый параметр изменяется не сразу, как в одноемкостных, а по истечении некоторого времени с нарастающей скоростью и также с течением времени устанавливается на новом значении (статические объекты) или начинает изменяться с постоянной скоростью (астатические объекты). Примеры многоемкостных статического и астатического объектов по изменению уровня воды во втором баке показаны на рис. 1.11, *а* и *б*.

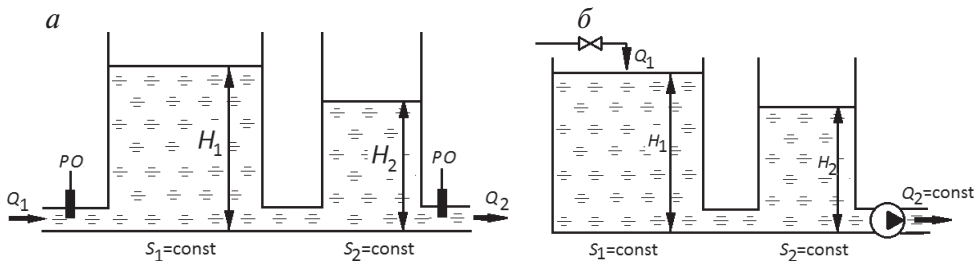


Рис. 1.11. Примеры многоемкостных объектов регулирования:

а — статический объект; *б* — астатический объект

Кривые разгона для этих объектов (рис. 1.12), как правило, снимаются экспериментально. По ним составляют простейшие модели многоемкостных объектов путем замены реального объекта на последовательное соединение звена с запаздыванием $\tau_{об}$ и одноемкостного статического или астатического объекта. Это позволяет получить передаточные функции моделей, которые широко используются при автоматизации теплоэнергетических объектов.

Для многоемкостных статических объектов получим

$$W_{об}^{\mu}(p) = \frac{\varphi(p)}{\mu_{об}(p)} = \frac{k_{об}^{\mu} \cdot e^{-p\tau_{об}}}{T_{об}p + 1},$$

где значения $k_{об}^{\mu}$, $T_{об}$ и $\tau_{об}$ получают по кривой разгона (см. рис. 1.12, *а*).

Для многоемкостного астатического объекта получим

$$W_{об}^{\mu}(p) = \frac{\varphi(p)}{\mu_{об}(p)} = \frac{k' \cdot e^{-p\tau_{об}}}{p} = \frac{e^{-p\tau_{об}}}{T_{об}p},$$

где k' и $\tau_{об}$ получают из кривой разгона (рис. 1.12, *б*).

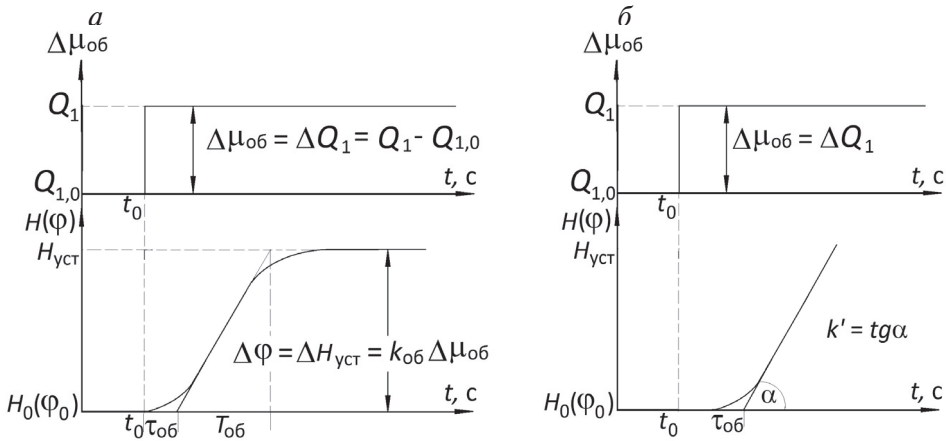


Рис. 1.12. Динамические характеристики многоемкостных объектов:
 а — статический объект; б — астатический объект

Сложные статические объекты характеризуются параметрами $k_{об}$, $T_{об}$ и $\tau_{об}$, где $\tau_{об}$ — время запаздывания объекта, а сложные астатические объекты характеризуются параметрами $T_{об}$ (определяется по k') и $\tau_{об}$.

1.2.3. Основные законы регулирования

Под законом регулирования понимают зависимость регулирующего воздействия $\mu_{рег}$ от изменения регулируемого параметра φ (в общем случае).

Различают следующие основные идеализированные законы регулирования: интегральный (И-закон), позиционное регулирование (Пз-закон) как частный случай И-закона, пропорциональный (П-закон), пропорционально-интегральный (ПИ-закон), пропорционально-дифференциальный (ПД-закон) и пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД-закон). Пропорционально-дифференциальный закон регулирования используется достаточно редко, поэтому рассмотрим кратко остальные законы.

И-закон. Выходная величина регулятора $\mu_{рег}$ (это фактически перемещение регулирующего органа) связана с регулируемым параметром φ уравнением

$$\mu_{рег} = \frac{k_p}{T_i} \int \varphi dt,$$

где k_p — коэффициент усиления регулятора (параметр настройки И-регулятора); T_i — время интегрирования. При $T_i \rightarrow 0$ регулирую-

щий орган будет перемещаться с большой скоростью и быстро достигать крайних значений (открыто полностью или закрыто). В таком случае основное время регулирующей системы будет находиться в крайних положениях, и И-закон переходит в Пз-закон (имеем позиционное регулирование). Примером позиционного регулирования может служить регулирование температуры в электрической печи с подачей напряжения питания с помощью реле (подано-отключено).

П-закон. Данный закон действует, когда в регулятор введена жесткая (постоянно действующая) отрицательная обратная связь по положению регулирующего органа ($\mu_{\text{рег}}$). Выходная величина регулятора $\mu_{\text{рег}}$ связана с регулируемым параметром φ уравнением

$$\mu_{\text{рег}} = k_p \varphi,$$

где k_p — коэффициент усиления регулятора (параметр настройки).

Этот закон достаточно широко используется, хотя и имеет недостаток — появляется небольшая ошибка регулирования в статических режимах работы (порядка 4–8 %).

ПИ-закон. Этот закон действует, когда в регулятор введена гибкая (действующая только при работе регулятора и снимающаяся при его отключении) обратная связь по положению регулирующего органа ($\mu_{\text{рег}}$).

Выходная величина регулятора $\mu_{\text{рег}}$ связана с регулируемым параметром φ уравнением

$$\mu_{\text{рег}} = k_p \varphi + \frac{k_p}{T_i} \int \varphi dt,$$

где k_p , T_i — параметры настройки ПИ-регулятора.

Этот закон находит наиболее широкое применение при автоматизации объектов регулирования.

ПИД-закон. ПИД-закон получается, когда в ПИ-регулятор вводится дополнительный импульс по скорости изменения регулируемого параметра. Выходная величина регулятора $\mu_{\text{рег}}$ связана с регулируемым параметром φ уравнением

$$\mu_{\text{рег}} = k_p \varphi + \frac{k_p}{T_i} \int \varphi dt + k_p T_d \frac{d\varphi}{dt},$$

где k_p , T_i , T_d — параметры настройки ПИД-регулятора, T_d — время дифференцирования.

Это наиболее общий закон регулирования. Из него можно получить предыдущие законы.

При нанесении возмущения λ на объект регулирования параметр начинает изменяться, регулятор включается и работает до тех пор, пока регулируемый параметр не вернется к заданному значению или не установится на новом значении. Изменение регулируемого параметра φ во времени при работе регулятора называют процессом регулирования. Графики процессов регулирования при различных законах показаны на рис. 1.12.

После нанесения на объект внешнего возмущения λ (в момент времени t_0) параметр φ начинает изменяться, и, как только он выйдет за пределы зоны нечувствительности $\Delta_{\text{неч}}$, регулятор включится в сторону восстановления параметра и будет работать до тех пор, пока регулируемый параметр φ не установится в пределах зоны нечувствительности. Время от момента первого включения регулятора в работу до его окончательного отключения называют временем регулирования t_p (рис. 1.13). Из графиков процессов регулирования следует, что И-, ПИ- и ПИД-законы дают точное регулирование в статических режимах (без статической ошибки), поэтому ПИ- и ПИД-законы являются основными законами регулирования, И-закон применяется редко из-за большого динамического отклонения параметра и времени регулирования.

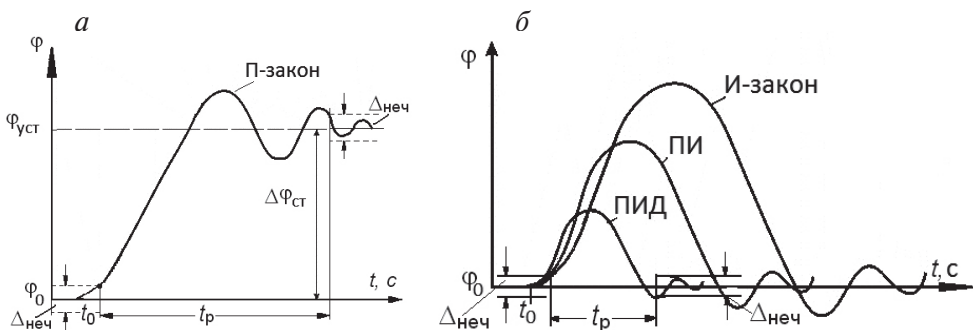


Рис. 1.13. Графики процессов регулирования:

a — П-закона; *б* — И-, ПИ-, ПИД-законов регулирования

(φ_0 — заданное значение параметра; $\varphi_{\text{уст}}$ — новое установившееся значение параметра; $\Delta\varphi_{\text{ст}}$ — статическая ошибка регулирования; $\Delta_{\text{неч}}$ — зона нечувствительности регулятора)

При автоматизации теплоэнергетических установок законы регулирования выбираются исходя из условий точности регулирования.

Обычно, если по технологии работы оборудования допустимы колебания параметра в заданных пределах, выбирают ПЗ-закон; если допустимы небольшие отклонения параметров от заданного значения в установившихся режимах, выбирают П-закон; если требуется регулирование без ошибки в статических режимах выбирают ПИ- или ПИД-законы регулирования.

1.2.4. Принципиальная структурная схема аналоговой САР при ее технической реализации

При технической реализации системы автоматического регулирования, кроме основных элементов регулятора, показанных на рис. 1.14, необходимо иметь дополнительные устройства, позволяющие реализовать систему на практике.

Измерительные устройства (ИУ) выпускаются промышленностью в виде датчиков для измерения параметров; исполнительные механизмы (ИМ) также выпускаются промышленностью. Элемент сравнения (ЭС) и усилитель (УУ) совместно с обратными связями включены в аналоговые регулирующие приборы и выпускаются промышленностью.

На рис. 1.14 ξ — сигнал отрицательной обратной связи; обр.св. — устройство обратной связи.

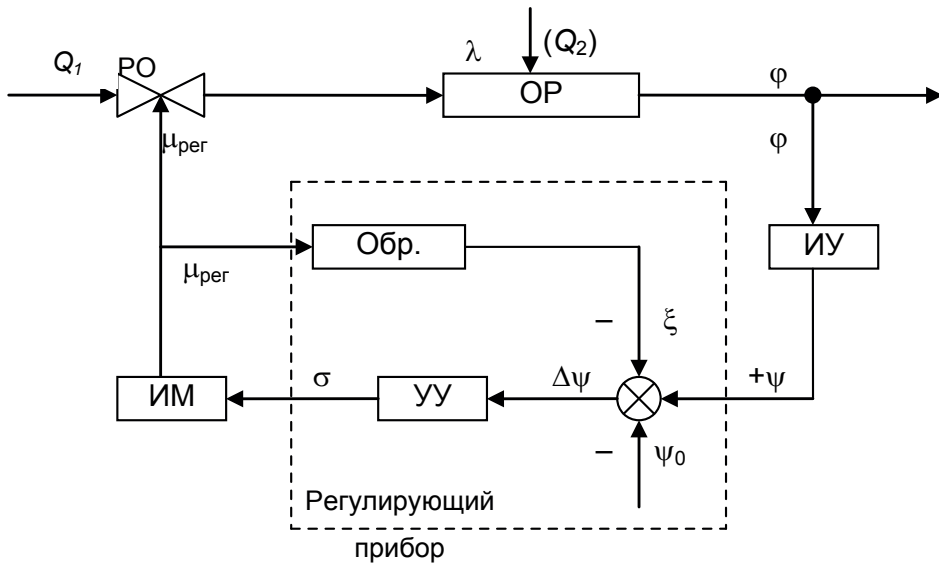


Рис. 1.14. Структурная схема САР

В аналоговых регулирующих приборах элементом сравнения служит измерительный блок (ИБ), а усилителем — электронный блок (ЭБ). Обратные связи встроены в регулирующий прибор.

Дополнительные устройства:

- 1) задатчик (ЗД) — для подачи в элемент сравнения электрического представления заданного значения параметра ψ_0 ;
- 2) после регулирующего прибора необходимо иметь возможность переключения цепей автоматики на цепи дистанционного управления регулирующим органом. Для этих целей служит переключатель управления (ПУ). В том случае, когда регулирующий прибор или датчик выйдут из строя, переходят на ручное дистанционное управление работой объекта регулирования;
- 3) для возможности ручного управления работой объекта служит ключ управления (КУ), с помощью которого можно открывать или закрывать регулирующий орган (РО);
- 4) исполнительный механизм (ИМ) должен автоматически или при ручном управлении закрывать или открывать регулирующий орган. Это означает, что электродвигатель исполнительного механизма должен включаться и вращаться то в одну, то в другую сторону, что осуществляется переброской фаз питания электродвигателя. Для переброски фаз питания электродвигателя служит магнитный пускатель (МП);
- 5) при ручном дистанционном управлении работой исполнительного механизма необходимо знать, в какую сторону оператор включает исполнительный механизм и на какую величину открывается или закрывается регулирующий орган. Для этих целей служит указатель положения регулирующего органа (УП), который имеет шкалу 0—100 % и работает от датчика перемещения (ДП), имеющегося в любом исполнительном механизме.

Все дополнительные устройства также в том или ином виде выпускаются промышленностью.

Для создания более сложных (многоимпульсных) систем регулирования регулирующие приборы имеют возможность подключения дополнительных датчиков (D_2 и D_3), которые на рис. 1.15 показаны пунктирными линиями: по расходам пара ($D_{\text{мп}}$) и питательной воды ($W_{\text{в}}$). Совместно с датчиком по уровню воды (H) в барабане парового котла они позволяют осуществить регулирование уровня воды на котлах средней и большой мощности.

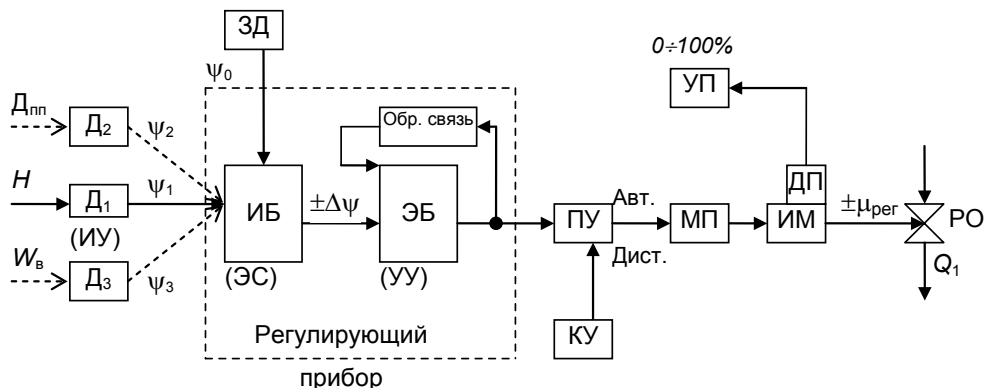


Рис. 1.15. Принципиальная структурная схема регулятора при его технической реализации:

Д1 — датчик уровня (давления, температуры и т. п.)

По такой схеме осуществляется регулирование в аналоговых (непрерывных) системах регулирования, но вся идеология управления сохраняется и при переводе системы на цифровое управление. Для этого в программу управления вводится возможность изменения заданного значения параметра, переключения на дистанционное управление регулирующим органом и наблюдения за его перемещением.

При автоматизации теплоэнергетических установок в целях длительной безаварийной работы, при технологических ограничениях отклонений параметров основными проблемами являются выбор и создание необходимых систем регулирования, обеспечивающих качественную и устойчивую работу установок в условиях различных нагрузок. Создание систем регулирования для поддержания основных параметров на необходимом уровне производится по вышеприведенной принципиальной структурной схеме.

ГЛАВА 2. Регулирующие органы теплоэнергетических установок

2.1. *Общее назначение регулирующих органов*

Из теории автоматического регулирования, рассмотрения структурной схемы САР и ее технической реализации следует, что исполнительные механизмы управляют перемещением регулирующих органов в сторону восстановления материального или энергетического балансов на притоке среды или энергии в объектах регулирования (управления) в переходных режимах их работы. Поскольку потоки материальных или энергетических сред в теплоэнергетических установках могут быть самыми разнообразными (вода, пар, газ, воздух и т. п.), постольку регулирующие органы могут иметь разное конструктивное оформление при решении конкретных задач регулирования.

Регулирующим органом называется устройство, позволяющее изменять расход или направление потока энергии или вещества в соответствии с требованиями технологического процесса.

Регулирующие органы теплоэнергетических установок можно разделить на три группы:

- 1) регулирующие органы дроссельного типа;
- 2) регулирующие органы объемного типа;
- 3) регулирующие органы скоростного типа.

Регулирующие органы дроссельного типа изменяют расход среды за счет изменения скорости и площади сечения потока при прохождении его через дросселирующее устройство, гидравлическое сопротивление которого является переменной величиной (вентили, клапаны и шиберы) (рис. 2.1).

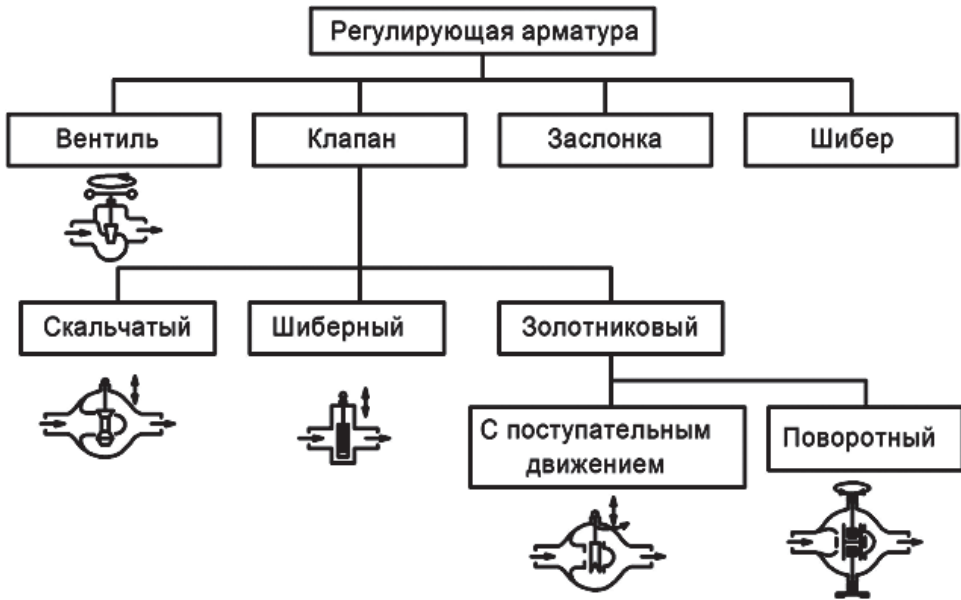


Рис. 2.1. Типы регулирующей арматуры

Массовый расход вещества через дроссельный регулирующий орган, кг/с, определяется по формуле

$$G = \mu_{po} F_{po} \sqrt{2\Delta p_{po} \rho}, \quad (2.1)$$

а объемный расход, м³/с, —

$$Q = \mu_{p.o} F_{p.o} \sqrt{2 \frac{\Delta p_{p.o}}{\rho}}, \quad (2.2)$$

где μ_{po} — коэффициент расхода, под которым понимают отношение действительного расхода среды к расчетному; $F_{p.o}$ — площадь открытия регулирующего органа, м²; $\Delta p_{p.o}$ — гидравлическое сопротивление дроссельного устройства, Па (Н/м²); ρ — плотность вещества, кг/м³.

Регулирующие органы объемного типа изменяют расход среды за счет изменения ее объема (ленточные питатели сыпучих сред при постоянной скорости перемещения ленты). Объемный расход сыпучей среды, м³/с, определяется по уравнению

$$Q = Fv,$$

где F — регулируемая площадь сечения потока, м²; v — постоянная скорость потока, м/с.

Регулирующие органы скоростного типа изменяют производительность транспортирующего устройства за счет скорости его вращения (перемещения). К регулирующим органам этого типа относят устройства регулирования частоты вращения двигателей (насосов, вентиляторов, дымососов, питателей). Требуемое изменение расходов определяется по уравнению

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2},$$

где Q_1, Q_2 — объемные расходы, м³/с; n_1, n_2 — число оборотов двигателей, об/мин.

Регулирующие органы совместно с измерительным устройством, регулирующим блоком и исполнительным механизмом через технологический процесс создают замкнутую систему регулирования, т. е. систему, посредством которой производится поддержание на заданном уровне одной или нескольких величин, характеризующих оптимальный режим этого процесса. Следовательно, каждое функциональное звено регулятора, равно как и сам процесс, не только участвуют в работе системы регулирования, но и оказывают влияние на качество регулирования в зависимости от статических и динамических свойств каждого звена и процесса.

Объекты регулирования бывают линейными и нелинейными. Нелинейность объекта регулирования чаще всего определяется путем изменения нагрузки на объект, что в свою очередь вызывает изменение его коэффициента передачи $K_{об}$. Помимо этого, на $K_{об}$ влияют искажения, вносимые нелинейностью самого регулирующего органа. Если пренебречь временем запаздывания τ и постоянной времени системы, то качество и устойчивость регулирования будут определяться как

$$K_c = K_{об} K_p,$$

где K_c — коэффициент передачи системы регулирования; $K_{об}$ — коэффициент передачи объекта; K_p — коэффициент передачи регулятора.

При изменении $K_{об}$ для получения качественного регулирования необходимо изменить K_p так, чтобы $K_c = \text{const}$. Коэффициент передачи объекта $K_{об}$ можно выразить через равенство

$$K_{об} = K_a K_{p,o},$$

где K_a — коэффициент передачи агрегата (аппарата), для которого применена система регулирования; $K_{p,o}$ — коэффициент передачи регулирующего органа.

Таким образом, чтобы сохранить постоянство K_a и $K_{об}$, кроме подбора коэффициента передачи регулятора K_p (параметра настройки регулятора), необходимо также подобрать регулирующий орган с такой статической характеристикой, которая бы компенсировала изменения K_p и $K_{об}$ для сохранения $K_c = \text{const}$.

Из рассмотренного выше следует, что для объектов с линейной характеристикой и при малоизменяющейся нагрузке регулирующий орган необходимо выбирать с линейной характеристикой, а для объектов с нелинейной характеристикой регулирующий орган должен иметь нелинейную характеристику, причем она должна быть зеркальным отображением характеристики объекта.

Для объектов с большим изменением нагрузки задача выбора характеристики регулирующего органа значительно усложняется и практически полностью решена быть не может. Она приближенно может быть решена расчетным путем при создании определенного (специального) профиля регулирующего органа.

Действие регулирующего органа определяется его статическими характеристиками, к которым относят:

- 1) диапазон регулирования;
- 2) рабочую расходную характеристику.

Под диапазоном регулирования $R_{p.o}$ понимают отношение максимального расхода среды к минимальному, соответствующее перемещению регулирующего органа из одного крайнего положения (максимально «открыто» — $x_{p.o}^{\max}$) в другое (минимально «закрыто» — $x_{p.o}^{\min}$) для регулирующих органов дроссельного и объемного типов или изменению числа оборотов от максимума до минимума для регулирующих органов скоростного типа

$$R_{p.o} = \frac{Q_{\max}}{Q_{\min}}; R_{p.o} = \frac{G_{\max}}{G_{\min}}.$$

Под рабочей расходной характеристикой понимают зависимость расхода среды Q (G) от положения регулирующего органа $x_{p.o}$, снятой в рабочих условиях (т. е. с учетом сопротивления трубопровода, на котором установлен регулирующий орган),

$$Q = f(x_{p.o}); G = f(x_{p.o}).$$

При выборе и отладке регулирующих органов стремятся получить достаточный диапазон регулирования для возможности управления

процессом при всех режимах и нагрузках агрегата (диапазон регулирования регулирующего органа $R_{p.o}$ должен быть больше диапазона изменения нагрузок агрегата $R_{o\delta}$) и линейную рабочую расходную характеристику в пределах этого диапазона.

2.2. Дроссельные регулирующие клапаны

Регулирующие клапаны служат для изменения расхода жидкости, пара или газа, транспортируемых по трубопроводам при давлении существенно выше атмосферного. Существует несколько конструктивных разновидностей клапанов, различающихся формами плунжера и седла (рис. 2.2).

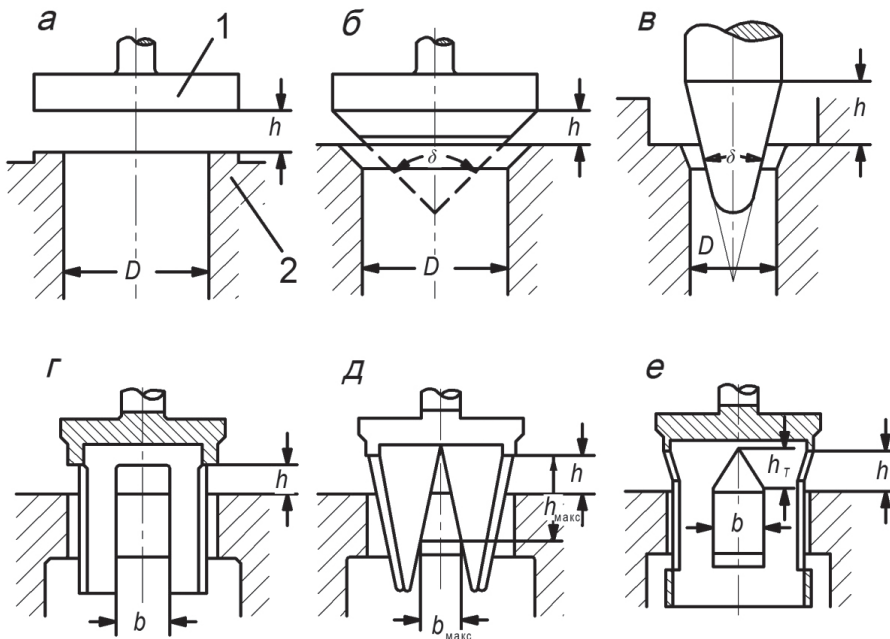


Рис. 2.2. Типы клапанов:

a — тарельчатый (1 — клапан, 2 — седло клапана); *б* — тарельчатый с конической опорной поверхностью; *в* — игольчатый; *з* — золотниковый с прямоугольными окнами; *д* — золотниковый с треугольными окнами; *е* — золотниковый с комбинированными окнами

Каждая конструкция имеет свою конструктивную характеристику — зависимость площади проходного сечения клапана F от положения плунжера h . Конструктивная характеристика клапана определяется формой и размерами плунжера и седла. Широко используются клапаны тарельчатые, конические, плунжерные с золотниковыми плунжерами и с плунжерами специального профиля.

Тарельчатый клапан с плоской опорной поверхностью (рис. 2.2, *a*) имеет линейную конструктивную характеристику. Проходное сечение клапана представляет собой цилиндрическую поверхность диаметром D и высотой h . Площадь этого сечения

$$F = \pi Dh.$$

Полное открытие клапан соответствует такому положению тарелки клапана, когда проходное сечение равно сечению седла клапана,

$$F_{\max} = \pi Dh_{\max} = \frac{\pi D^2}{4},$$

откуда определяется максимальный ход клапана

$$h_{\max} = \frac{1}{4} D.$$

Подъем плунжера выше h_{\max} уже не приводит к заметному увеличению расхода среды, поскольку основное дросселирование потока производится в сечении седла клапана.

Тарельчатый клапан с плоской опорной поверхностью редко применяется в системах регулирования, так как, при больших скоростях протекания среды через клапан, кромки тарелки и седла быстро истираются, что приводит к изменению характеристики клапана.

Тарельчатый клапан с конической опорной поверхностью (см. рис. 2.2, *б*) используется для регулирования больших расходов. Проходным сечением служит кольцевая щель между внутренней кромкой плунжера и опорной поверхностью седла.

Проходное сечение клапана определяется по уравнению конструктивной характеристики

$$F = \pi h \sin(\delta / 2) (d + h \sin(\delta / 2) \cos(\delta / 2)).$$

Клапаны этого типа применяются чаще всего с углом $\delta = 90^\circ$, тогда уравнение проходного сечения будет

$$F = 2,22h(d + 0,5h)$$

и максимальная высота подъема клапана

$$h_{\max} = 0,306d .$$

Игольчатые клапаны (см. рис. 2.2, *в*) применяются для более тонкого регулирования при малых расходах среды. Проходным сечением этих клапанов служит коническая щель между внутренней кромкой седла и конической поверхностью плунжера. Уравнение конструктивной характеристики игольчатого клапана имеет вид

$$F = \pi h \sin(\delta / 2) (D - h \sin(\delta / 2) \cos(\delta / 2)) .$$

Наиболее распространены клапаны с углом $\delta = 15^\circ$, тогда имеем

$$F = 0,41h(D - 0,13h) \quad (2.3)$$

и максимальный ход клапана будет

$$h_{\max} = 3,78D .$$

Золотниковые клапаны (рис. 2.2, *з, д, е*) представляют собой полый цилиндр с прорезанными в его боковой стенке окнами. Величина проходного сечения определяется по суммарной площади той части окон, которая выступает над кромкой седла. Окна могут быть прямоугольного сечения, треугольного или комбинированными.

Если окна прямоугольные, конструктивная характеристика клапана будет линейной

$$F = nbh ,$$

где n — количество окон в золотнике; b — ширина окна; h — высота подъема.

Максимальный ход клапана определится как

$$h_{\max} = \frac{\pi D^2}{4nb} ,$$

где D — диаметр седла клапана.

Чаще используют золотниковый клапан с треугольными окнами. Его конструктивная характеристика определяется в соответствии с квадратичной зависимостью

$$F = n \frac{b_{\max}}{2h_{\max}} h^2 ,$$

где b_{\max} — ширина основания выступающей части окна при полном подъеме клапана $h = h_{\max}$.

Наряду с треугольными окнами, достаточно широко применяют комбинированные окна, составленные из треугольника и прямоугольника. Конструктивная характеристика такого клапана будет составлена из двух частей — квадратичного и линейного.

Конструктивные характеристики рассмотренных типов клапанов показаны на рис. 2.3, на котором для удобства сравнения построение выполнено в относительных величинах хода клапана h/h_{\max} и F/F_{\max} .

Если по условиям работы клапана необходимо иметь конструктивную характеристику, отличную от вышеприведенных, то выбирают специальный профиль плунжера или окна золотника. Примеры таких специально профилированных клапанов представлены на рис. 2.4. Наиболее распространены клапаны с логарифмической характеристикой.

$$\ln F = \frac{h}{h_{\max}} \ln \frac{F_{\max}}{F_0} + \ln F_0,$$

где F_0 — начальное проходное сечение клапана при его полном закрытии (при $h = 0$). Обычно это значение принимают за $0,05 F_{\max}$.

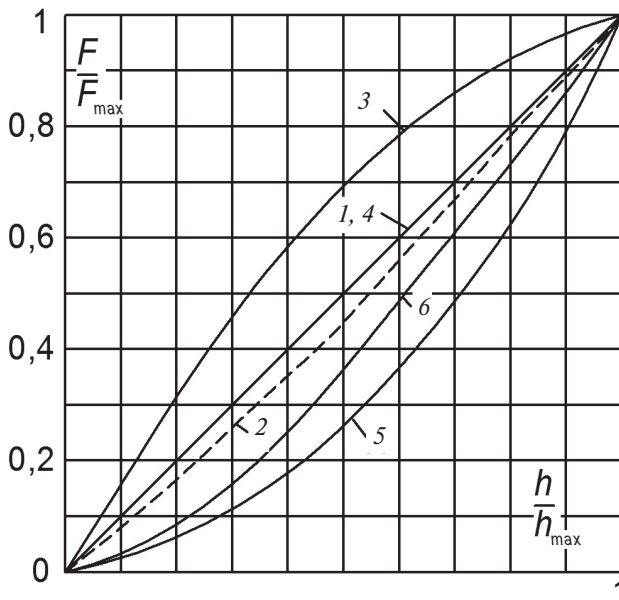


Рис. 2.3. Конструктивные характеристик клапанов:

- 1 — тарельчатый клапан; 2 — тарельчатый с конической опорной поверхностью;
 3 — игольчатый клапан ($\delta = 30^\circ$); 4 — золотниковый клапан с прямоугольными окнами;
 5 — золотниковый клапан с треугольными окнами;
 6 — золотниковый клапан с прямоугольными окнами ($h_r = 0,4h_{\max}$)

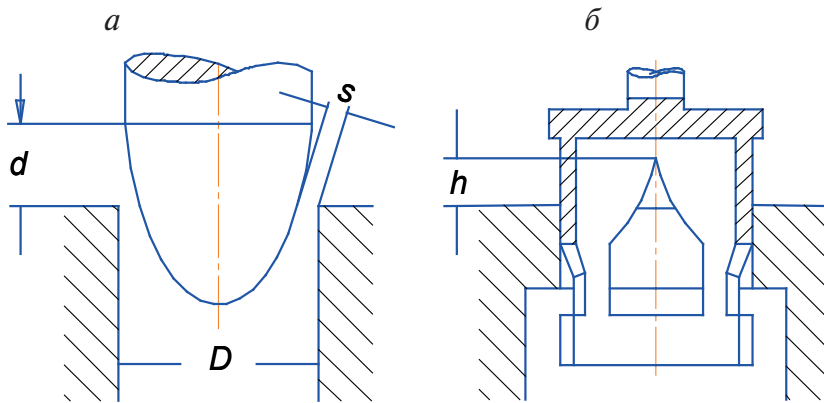


Рис. 2.4. Специально профилированные клапаны:

a — плунжерный; *б* — золотниковый

Размеры и конструктивное выполнение регулирующих клапанов зависит от их назначения. Для регулирования температуры перегрева впрыском, непрерывной продувки и в других случаях регулирования относительно малых расходов применяют, как правило, односедельные дроссельные клапаны (игольчатые и плунжерные специального назначения). При низких параметрах среды (с условным давлением $p_v \leq 1,6$ МПа) корпус обычно выполняют чугуном, а при более высоких параметрах — литым. Плунжеры, золотники и седла изготавливают из легированных сталей с высокой эрозионной стойкостью.

Достоинством односедельных клапанов является их простота. Основным их недостатком является то, что они не разгружены, т. е. при закрытии клапана необходимо преодолевать усилие, обусловленное действием давления среды на клапан.

При больших проходных сечениях клапана и высоком давлении среды это усилие становится настолько значительным, что от применения односедельных клапанов приходится отказываться и переходить к использованию разгруженных двухседельных клапанов (рис. 2.5).

Расчет регулирующих органов может быть конструктивным и поверочным.

При конструктивном расчете по заданной пропускной способности и условиям работы (параметры среды) выбирается клапан из имеющихся типоразмеров серийно выпускаемой регулирующей арматуры. Приближенный конструктивный расчет производится с учетом следующего правила: отношение площади прохода клапана $F_{\text{кл. max}}$, определенного из формул (2.1) и (2.2), к площади условного прохода

$F_y = \frac{\pi D_y^2}{4}$, где D_y — диаметр условного прохода, должно быть не более

0,6–0,7, или $F_{\text{кл. max}}/F_y = 0,6 \dots 0,7$. Превышение этого значения приводит к неэффективной работе клапана как регулирующего органа вследствие малого влияния сопротивления клапана на перераспределение давления в системе, а следовательно, и на расход.

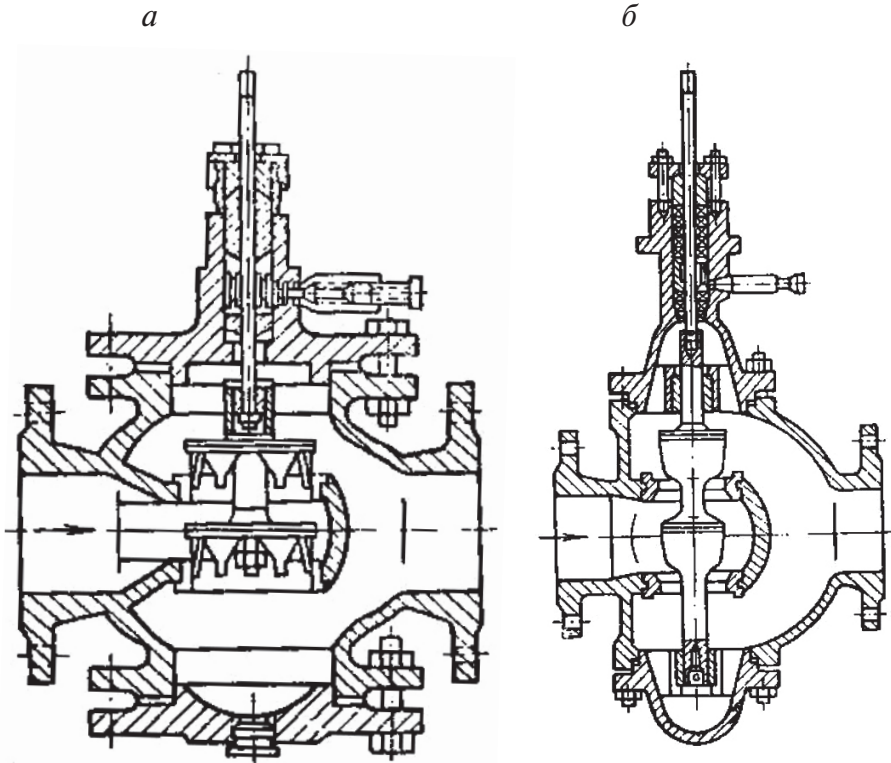


Рис. 2.5. Двухседельные разгруженные клапаны:

а — золотниковый; *б* — плунжерный

Цель поверочного расчета состоит в оценке максимальной пропускной способности клапана для определения диапазона регулирования $R_{p,0}$ и построения его рабочей расходной характеристики по заданному типоразмеру и известным условиям работы. Поверочный расчет производится по формулам (2.1) и (2.2).

Максимальный расход несжимаемой жидкости определяется по выражению (2.1) для F_{max} , при этом коэффициент расхода $\mu_{\text{кл}}$ зависит от конструкции клапана и степени его открытия (рис. 2.6).

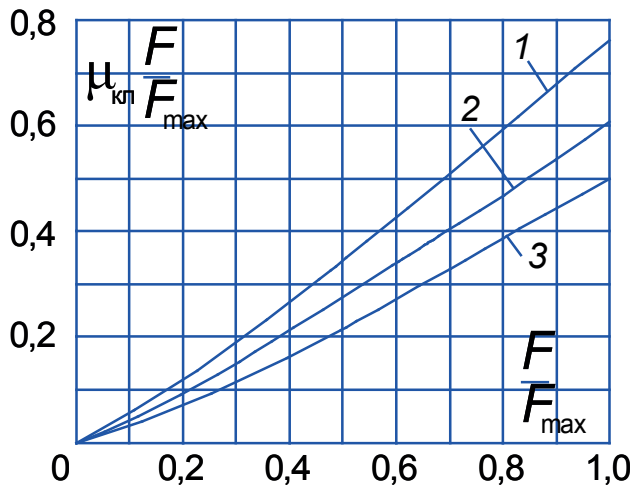


Рис. 2.6. Эффективное проходное сечение клапана:

1 — игольчатые односедельные; 2 — игольчатые двухседельные и золотниковые; 3 — прочие

Для величин Δp , кгс/см², и F , см², расход воды, кг/с, определится по формуле

$$G = 0,044\mu_{кп} F \sqrt{\Delta p \rho} . \quad (2.4)$$

Для газа и пара расчет ведется по этой же формуле с учетом поправки на расширение потока ε

$$G = 0,044\mu_{кп} F \varepsilon \sqrt{\Delta p \rho} . \quad (2.5)$$

Величина ε подсчитывается по следующим формулам:

для $\frac{\Delta p}{p_n} \leq 0,5$ $\varepsilon = 1 - \beta \frac{\Delta p}{p_n} ,$

для $\frac{\Delta p}{p_n} \geq 0,5$ $\varepsilon = 0,95 - (\beta - 0,1) \frac{\Delta p}{p_n} .$

Значения коэффициента β рекомендуются следующие:

- насыщенный пар 0,5
- перегретый пар и трехатомные газы 0,47
- воздух и двухатомные газы 0,45

Рабочую расходную характеристику регулирующих органов обычно снимают экспериментально на действующем оборудовании. При невозможности опытной проверки соответствия расходной характе-

ристики ее заданной форме производится расчет и построение рабочей расходной характеристики клапанов.

Расчет сводится к определению пропускной способности дроссельного устройства $q = G / G_{\max}$ в зависимости от высоты подъема плунжера h или угла поворота φ его профилированной части относительно седла. Расчет проводится по формулам (2.4) и (2.5), в которых величины F и Δp изменяют свои численные значения: F в зависимости от h или φ , а Δp в зависимости от располагаемого напора p_n и гидравлического сопротивления сети Δp_c , которые зависят от относительного расхода g .

При переменном перепаде давления на клапане располагаемый напор p_n расходуется на преодоление сопротивления клапана $\Delta p_{\text{кл}}$ и на сопротивление сети Δp_c

$$p_n = \Delta p_{\text{кл}} + \Delta p_c . \quad (2.6)$$

Распределение относительных потерь располагаемого напора в зависимости от относительного расхода среды представлено на рис. 2.7.

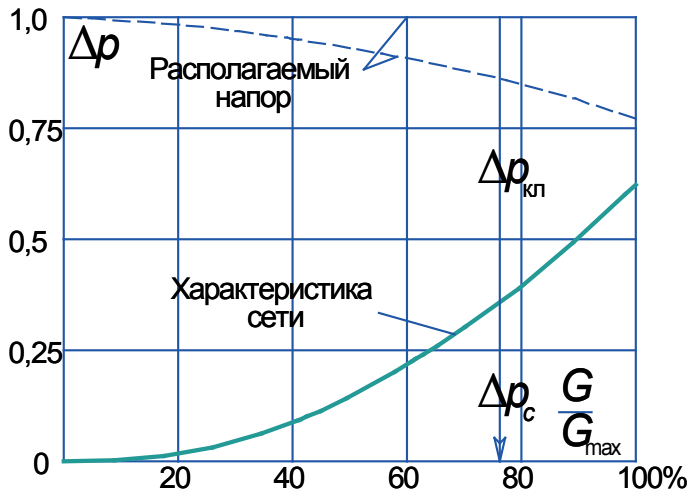


Рис. 2.7. Распределение потерь располагаемого напора

$\frac{\Delta p}{p_n} = 1$ соответствует случаю источника с постоянным давлением,

штриховые линии $\frac{\Delta p}{p_n}$ (рис. 2.7) — под действием насоса (характеристика насоса).

График зависимости относительного гидравлического сопротивления сети $\frac{\Delta p}{p_n}$ от относительного расхода g_i приближенно может быть рассчитан по формуле

$$\frac{\Delta p_c}{p_n} = \mu_c g_i^2, \quad (2.7)$$

где μ_c — коэффициент расхода сети.

Располагая хотя бы одной точкой характеристики сопротивления сети (рис. 2.7), можно определить численное значение μ_c из формулы (2.7) и вычислить значение p_{ci} при изменении относительного расхода g_i в пределах 0–1.

Расчет дроссельных регулирующих органов при переменном перепаде давления производится по вышеприведенным формулам, но с учетом того, что перепады давлений $\Delta p_{кл}$ в каждом положении различны и определяются расходом G_i .

Для примера используем расчет максимальной пропускной способности односедельного игольчатого клапана с заданной конструктивной характеристикой и построение его рабочей расходной характеристики.

Дано: диаметр седла $D = 2$ см; угол иглы $\delta = 15^\circ$; располагаемый напор $p_n = 5$ кгс/см²; перепад на клапане при максимальном открытии $\Delta p_{кл.min} = 2$ кгс/см²; регулируемая среда — вода при температуре $t = 150$ °С; плотность среды $\rho = 917$ кг/м³.

1. Определим F_{max} :

$$F_{max} = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 2^2}{4} = 3,14 \text{ см}^2.$$

2. Определим G_{max} :

$$G_{max} = 0,044 \mu_{кл} F_{max} \sqrt{\Delta p_{min} \rho}.$$

Значение коэффициента расхода $\mu_{кл}$ определим по графику рис. 2.6 для $F/F_{max} = 1$; $\mu_{кл} = 0,75$.

$$G_{max} = 0,044 \cdot 0,75 \cdot 3,14 \cdot \sqrt{2 \cdot 917} \approx 4,4 \text{ кг/с}.$$

3. Выразим сопротивление линии при максимальном расходе $\left(g = \frac{G_{max}}{G_{max}} = 1 \right)$ из выражения (2.6):

$$\Delta p_{c \max} = p_n - \Delta p_{кл.min} = 5 - 2 = 3 \text{ кгс/см}^2.$$

4. Коэффициент расхода сети μ_c выразим из формулы (2.7)

$$\mu_c = \frac{\Delta p_{c \max}}{p_H} = \frac{3}{5} = 0,6.$$

5. Выразим сопротивление сети Δp_{ci} , кгс/см², при расходах $G_i = 0,1 \dots 1$ из формулы (2.7) и перепада на клапане $\Delta p_{кли}$ при тех же расходах

$$\Delta p_{кли} = \mu_c p_H \frac{G_i^2}{G_{\max}^2} = \frac{0,6 \cdot 5 G_i^2}{(4,4)^2} = 0,156 G_i^2.$$

6. Построим рабочую расходную характеристику клапана $G_i = f(h_i)$. Для этого зададимся $G_i = 1; 2; 3; 4; 4,4$ кг/с. По этим расходам определим эффективное живое сечение клапана

$$\frac{\mu_{кл} F_i}{F_{\max}} = \frac{G_i}{0,044 F_{\max} \sqrt{\Delta p_{кли} \rho}} = \frac{G_i}{0,044 \cdot 3,14 \sqrt{917 \cdot \Delta p_{кли}}} = \frac{0,239 G_i}{\sqrt{\Delta p_{кли}}}.$$

7. По кривой 1 (на рис. 2.6) определяется F/F_{\max} и проходные сечения при разных расходах G_i :

$$F_i = \left(\frac{F_i}{F_{\max}} \right) F_{\max}.$$

8. По уравнению конструктивной характеристики игольчатого клапана (2.3) и значениям F_i определим высоту подъема клапана при заданных значениях расхода G_i :

$$h_i = 7,7 - \sqrt{59,8 - 18,9 F_i}.$$

Результаты расчетов сводятся в таблицу, приведенную ниже.

Q_i , кг/с (Q_i , т/ч)	0	1 (3,6)	2 (7,2)	3 (10,8)	4 (14,4)	4,4 (15,84)
$\Delta p_{кли} = 5 - 0,156 G_i^2$, кгс/см ²	5	4,844	4,376	3,56	2,5	2,00
$\frac{\mu_{кл} F_i}{F_{\max}} = \frac{0,29 G_i}{\sqrt{\Delta p_{кли}}}$	0	0,13	0,28	0,46	0,74	0,75
F_i / F_{\max}	0	0,14	0,30	0,47	0,73	1,00
$F_i = \left(\frac{F_i}{F_{\max}} \right) F_{\max}$, см ²	0	0,44	0,94	1,47	2,30	3,14
$h_i = 7,7 - \sqrt{59,3 - 18,9 F_i}$, см	0	0,55	1,35	2,10	3,70	7,70

На рис. 2.8 представлена рабочая расходная характеристика игольчатого клапана, построенная по расчетным данным.

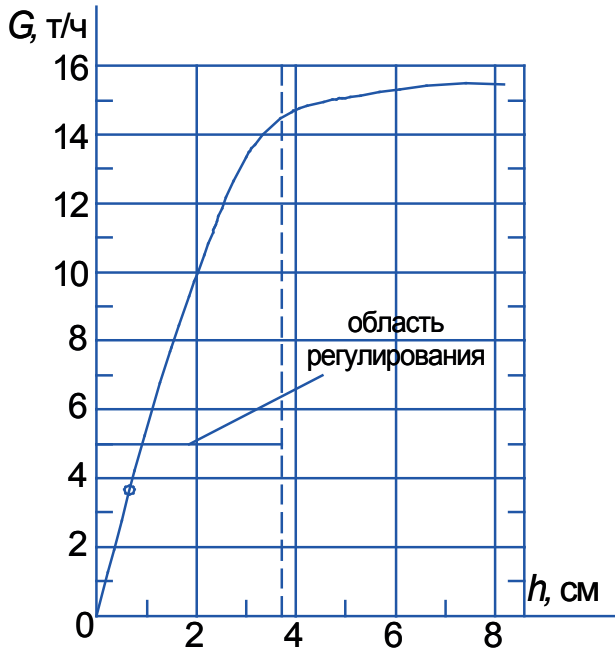


Рис. 2.8. Рабочая характеристика игольчатого клапана

Рабочая характеристика клапана показывает, что только начальная часть характеристики в пределах перемещения клапана 0–4 см близка к линейной и может быть использована для регулирования. Пределы области регулирования устанавливаются путем ограничения перемещения регулирующего органа (от $h_{\min} = 0$ до $h_{\max} = 4$ см) с помощью путевых (или концевых) выключателей исполнительного механизма.

На рис. 2.9 представлена рабочая расходная характеристика золотникового клапана комбинированными окнами, из которой следует, что линейная часть характеристики находится в пределах открытия клапана $h_{\min} = 15$ мм... $h_{\max} = 50$ мм. Следовательно, область регулирования находится в пределах 40–300 т/ч, и при максимальном закрытии клапана (h_{\min}) он будет пропускать порядка 10 % расхода воды от ее максимального значения.

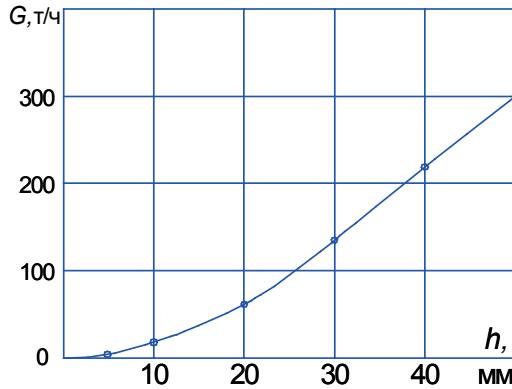


Рис. 2.9. Рабочая характеристика золотникового клапана с комбинированными окнами

При конструктивных расчетах клапана, работающего на переменном перепаде давления, необходимо иметь в виду, что соотношение сопротивления клапана $\Delta p_{\text{кл}}$ и сопротивления сети Δp_c оказывает существенное влияние на вид рабочей расходной характеристики. Чем большая доля располагаемого напора p_n используется в качестве перепада давления на клапане $\left(\frac{\Delta p_{\text{кл}}}{p_n}\right)$, тем больше рабочая характеристика приближается к конструктивной.

На рис. 2.10 приведены в качестве примера четыре рабочие характеристики клапана с линейной конструктивной характеристикой. Когда сопротивление клапана при полном открытии составляет лишь 0,05 располагаемого напора, почти весь диапазон регулирования приходится на незначительную долю хода, а перемещение клапана при больших открытиях практически уже не сказывается на заметном изменении расхода. Следовательно, такой клапан с очень низким сопротивлением работает неудовлетворительно. Однако слишком завышенное сопротивление клапана вызывает дополнительную потерю энергии на преодоление этого сопротивления.

Для того чтобы обеспечить достаточную действенность клапана на всем рабочем ходе, стараются выбрать сечение клапана таким, чтобы сопротивление при максимальной нагрузке составляло 50–60 % располагаемого напора (о чем уже было сказано выше). В тех случаях, когда по техническим или экономическим соображениям выполнить

это условие затруднительно, применяют специальные профилированные клапаны. Их конструктивная характеристика обеспечивает незначительные открытия в начале хода клапана и более резкое увеличение проходного сечения в положениях, близких к полному открытию.

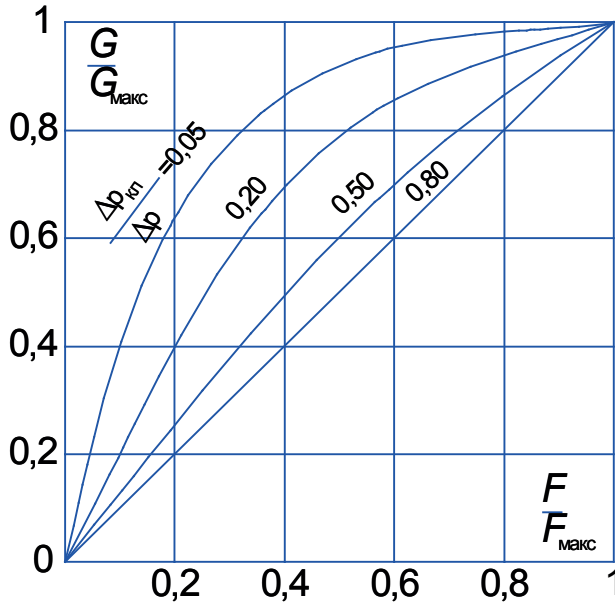


Рис. 2.10. Влияние соотношения между сопротивлением и располагаемым напором на рабочую характеристику клапана

В общем случае, если нужно обеспечить заданную рабочую характеристику клапана, выбирают специальный профиль с учетом сопротивления сети, свойств среды и других конкретных условий.

Нерасчетное сопротивление сети, располагаемого напора, колебания расходов приводят к нестабильности рабочих характеристик регулирующих органов, которые являются причиной дополнительных возмущений, возникающих в системе регулирования. Это ухудшает качество работы системы регулирования.

Таким образом, необходимым условием нормальной работы регулирующего органа в расчетном диапазоне является стабилизация гидравлического сопротивления сети и характеристики располагаемого напора, что может быть достигнуто проведением ряда мероприятий: проверки степени открытия запорных органов, надежным резервированием источников питания, стабилизацией расходов и т. п.

2.3. Дроссельные поворотные заслонки

Поворотные дроссельные заслонки служат для регулирования расходов жидкости, пара или газа, протекающих по трубопроводу круглого сечения или коробу прямоугольного сечения.

В отличие от регулирующих клапанов, заслонки имеют, как правило, значительно большее сечение и применяются в тех случаях, когда перепад давления на регулирующем органе должен быть малым.

Обычно поворотные дроссельные заслонки применяются для управления подачей газообразного топлива, воздуха, дымовых газов, пара с низким давлением, хотя могут использоваться и при подаче воды при небольших давлениях.

По форме сечения бывают круглыми, устанавливаемыми в трубопроводах (рис. 2.11, *а*, *б*), прямоугольными, предназначенными для коробов и газоходов прямоугольного сечения.

Заслонки прямоугольного сечения выполняются: однолопастными (рис. 2.11, *в*), многолопастными с разделительными перегородками (рис. 2.11 *г*) и многолопастными без разделительных перегородок (рис. 2.11, *д*), их называют жалюзийными заслонками.

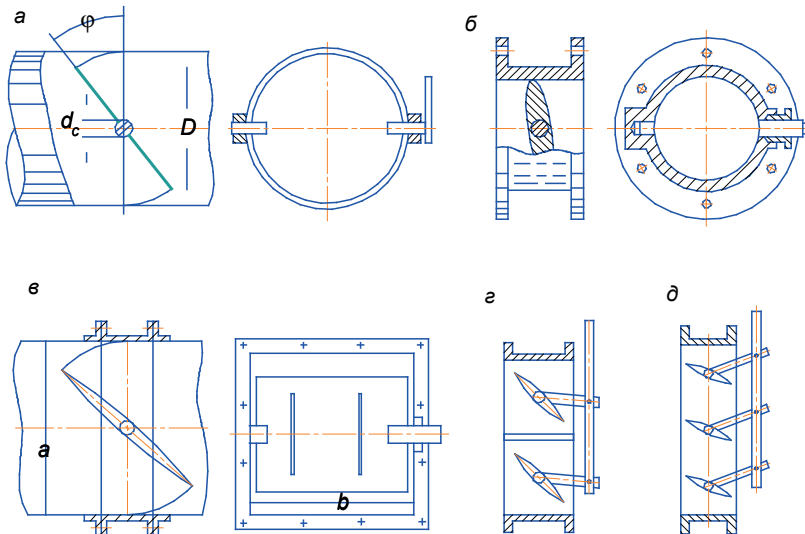


Рис. 2.11. Поворотные дроссельные заслонки.

а — круглая листовая; *б* — круглая литая; *в* — прямоугольная однолопастная; *г* — многолопастная с разделительными перегородками; *д* — жалюзи

Если заслонки работают при сравнительно невысоких температурах и к ним не предъявляются требования обеспечить плотное прикрытие проходного сечения, то они изготавливаются из листовой стали и не имеют упоров. В положении полного закрытия кольцевой зазор у таких заслонок составляет около $(0,002...0,005)D$, где D — диаметр трубопровода. Для увеличения жесткости конструкции листовой заслонки часто предусматривают ребра, а для увеличения плотности закрытия прямоугольных заслонок — упоры. Для обеспечения большой плотности и работе при более высоких температурах применяют литые чугунные заслонки (рис. 2.11, б).

Проходное сечение поворотной заслонки соответствует разности между площадью условного прохода F_y и проекцией площади заслонки на поперечное сечение. Отсюда конструктивная характеристика идеальной (тонкой и плотной) заслонки выражается зависимостью

$$F = F_y (1 - \cos \varphi) = \frac{\pi D_y}{4} (1 - \cos \varphi),$$

где F_y — сечение условного прохода заслонки; φ — угол открытия заслонки.

Реальная конструктивная характеристика получается диаметром d_c с учетом влияния кольцевого зазора и частичного дросселирования потока ступицей.

Таким образом, реальная заслонка будет иметь максимальное проходное сечение не при угле поворота заслонки $\varphi = 90^\circ$, а в положении $\varphi_{\max} < 90^\circ$, когда полотно заслонки загорожено ступицей. Дальнейшее увеличение угла поворота не приведет к увеличению проходного сечения, поэтому не имеет смысла.

Порядок расчета заслонок и построение их рабочих характеристик такой же, как для регулирующих клапанов. Рабочая характеристика заслонок также определяется в соответствии с конструкцией, размерами и условиями работы регулирующего органа в сети. Для построения рабочей характеристики необходимо знать характеристику сети Δp_c и располагаемый напор p_n и определить зависимость перепада давления на заслонке при разных расходах среды.

При конструктивных расчетах необходимо учитывать, что чем больше сопротивление заслонки по сравнению с сопротивлением сети при максимальном расходе, тем характеристика ближе к линейной зависимости. Из этих соображений желательно выбрать сечение трубопро-

вода и заслонки такими, чтобы для полного пропуска среды сказалось достаточным открытие заслонки на угол $\varphi = 60...70^\circ$.

Расход среды через заслонку определяется по тем же формулам, что расход среды через клапан. Для приближенных расчетов заслонок можно пользоваться зависимостями эффективного проходного сечения $\frac{\mu_3 F}{F_y}$ от угла поворота заслонки φ , приведенными на рис. 2.12.

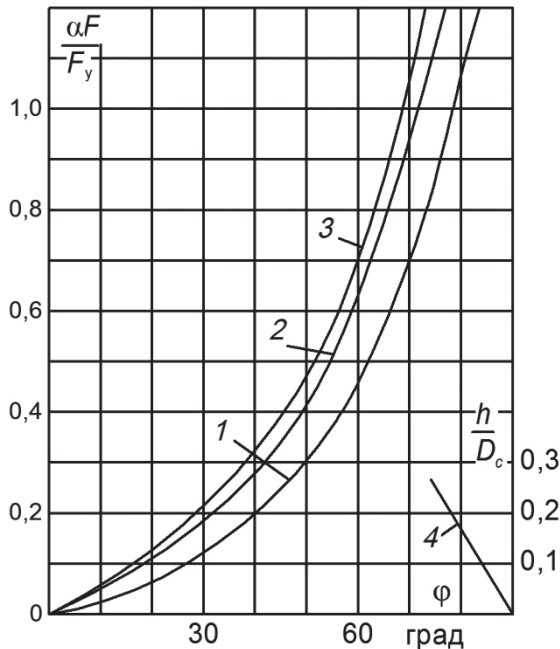


Рис. 2.12. Эффективное проходное сечение поворотных заслонок:

1 — однолопастные круглые, прямоугольные и многолопастные заслонки с разделительными перегородками; 2 — двухлопастные жалюзи; 3 — трехлопастные жалюзи; 4 — зависимость φ_{\max} от относительной толщины ступицы

При положениях, близких к закрытию, коэффициент расхода $\mu_{3,0}$ возрастает, поэтому для определения пропуска среды через заслонку в положении закрытия рекомендуется принимать $\mu_{3,0} = 2...3$.

Приведем пример приближенного расчета рабочей расходной характеристики при подаче газообразного топлива в топку котла, регулируемого поворотной заслонкой.

Дано: расход газа при номинальной нагрузке котла составляет $16\,000\text{ м}^3/\text{ч} = 4,444\text{ м}^3/\text{с}$. Давление газа в магистрали p_n поддерживается постоянным, равным 5000 Па. Сопротивление газопровода от маги-

страли к котлу (включая горелку) составляет при номинальной нагрузке $\Delta p_c^{\max} = 1650$ Па. Плотность газа $\rho = 1,16$ кг/м³. Необходимо выбрать сечение заслонки и построить ее рабочую расходную характеристику.

1. Принимаем коэффициент запаса регулирующего органа по производительности $k = 1,25$, тогда максимальный регулируемый пропуск газа будет

$$Q_{\max} = k Q_{\text{ном}} = 1,25 \cdot 4,444 = 5,555 \text{ м}^3/\text{с}.$$

2. Перепад давления на заслонке при расходе Q_{\max}

$$\Delta p_3^{\max} = p_{\text{н}} - \Delta p_c^{\max} \frac{Q_{\max}^2}{Q_{\text{ном}}^2} = 5000 - 1650 \cdot \frac{(5,555)^2}{(4,444)^2} = 2422 \text{ Па}.$$

3. Эффективное проходное сечение заслонки, соответствующее расходу Q_{\max} , определим при степени сжатия $\varepsilon = 1$.

$$\mu_3 F_{\max} = \frac{Q_{\max}}{\sqrt{2 \frac{\Delta p_3^{\max}}{\rho}}} = \frac{5,555}{\sqrt{2 \cdot \frac{2422}{1,16}}} = 0,086 \text{ м}^2 = 860 \text{ см}^2.$$

4. Принимаем, что Q_{\max} соответствует углу поворота заслонки $\varphi = 60^\circ$. По графику (см. рис. 2.12) находим для этого угла значение $\frac{\mu_3 F_{\max}}{F_y} = 0,47$, откуда определим сечение условного прохода

$$F_y = \frac{\mu_3 F_{\max}}{0,47} = \frac{860}{0,47} = 1830 \text{ см}^2.$$

5. Диаметр условного прохода (диаметр заслонки) будет

$$D_y = \sqrt{\frac{4F_y}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 1830}{3,14}} = 48,3 \text{ см}.$$

Округляя до ближайшего стандартного значения, примем $D_y = 50$ см = 0,5 м.

6. Эффективное проходное сечение при полном закрытии заслонки F_0 определим, приняв ширину зазора $0,002 D_y$, а коэффициент расхода

$$\mu_{30} \cdot F_0 = \mu_{30} \cdot 0,002 \pi D_y^2 = 3 \cdot 0,002 \cdot 3,14 \cdot 50^2 = 47,1 \text{ см}^2 = 47,1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

7. Расход через закрытую заслонку при максимальном перепаде давлений $\Delta p_{\max} = p_{\text{п}} = 5000$ Па составит

$$Q_0 = \mu_{3,0} \cdot F_0 \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p_{\max}}{\rho}} = 47,1 \cdot 10^{-4} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 5000}{1,16}} = 0,437 \text{ м}^3/\text{с} = 1574 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

8. Зададимся промежуточными значениями расхода Q_i и определим соответствующие им углы открытия заслонки φ_i . Результат расчетов сведены ниже.

Q_i [м ³ /с] / Q_i [тыс.м ³ /ч]	1/3,6	2/7,2	3/10,8	4/14,4	5/18	5,555/20
$\Delta p_{3i} = 5000 - 1650 \frac{Q_i^2}{(4,444)^2}$, кгс/см ²	4916	4666	4248	3663	2911	2422
$\mu_3 F_i = \frac{Q_i \cdot 10^4}{2 \frac{\Delta p_{3i}}{\rho}}$, см ²	110	220	350	470	710	860
$\mu_3 F_i / F_y = \frac{\mu_3 F_i}{1830}$	0,06	0,12	0,191	0,257	0,388	0,47
φ_i°	20	30	38	46	55	60

По результатам расчетов строим рабочую расходную характеристику (рис. 2.13).

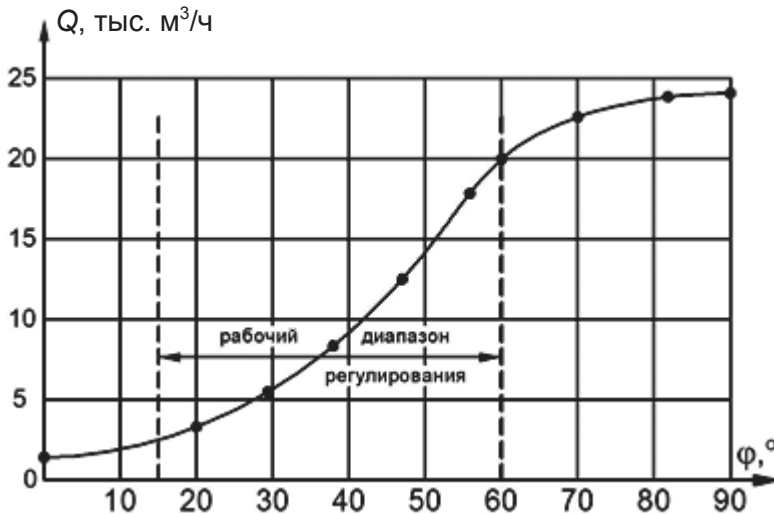


Рис. 2.13. Рабочая расходная характеристика дроссельной заслонки

Для того чтобы выяснить приближенный вид характеристики за пределами рабочего диапазона, можно определить расход газа через заслонку при полном ее открытии. Принимаем диаметр ступицы $d_c = 0,1D_y$. В этом случае

$$\varphi_{\max} = \arccos \frac{d_c}{D_y} = 84^\circ;$$

$$\frac{\mu_3 F}{F_y} = 1,21 \text{ (по рис. 2.12).}$$

Из графика сопротивления сети $\Delta p_c = f(\varphi)$ экстраполяцией сети и сопротивление заслонки при угле открытия $\varphi_{\max} = 84^\circ$: $\Delta p_3^{\max} \approx 520$ Па, тогда Q_{\max} при $\varphi_{\max} = 84^\circ$ будет

$$Q_{\max} = 1,21 \cdot 1830 \cdot 10^{-4} \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{520}{1,16}} = 6,623 \frac{\text{м}^3}{\text{с}} = 23,865 \frac{\text{тыс. м}^3}{\text{ч}}.$$

На рис. 2.13 примерный вид характеристики при углах $\varphi > 60^\circ$ показан штриховой линией.

2.4. Регулирование производительности тягодутьевых машин

Регулирование производительности вентиляторов и дымососов может осуществляться дросселированием потока на всасе, изменением угла входа потока на рабочее колесо с помощью направляющих аппаратов и изменением числа оборотов двигателя.

Дроссельное регулирование является самым простым, но самым неэкономичным способом регулирования производительности тягодутьевых машин. Характеристика машины при этом способе остается неизменной; а для уменьшения производительности создают с помощью поворотной дроссельной заслонки дополнительное сопротивление тракта. Дроссельное регулирование обеспечивает широкий диапазон изменения расхода среды, но вследствие преодоления дополнительного сопротивления вызывает повышенный расход электроэнергии на тягу и дутье, в связи с чем используется достаточно редко.

Регулирование с помощью направляющих аппаратов получило наибольшее распространение. Направляющий аппарат представляет собой многолопастное дроссельное устройство, установленное непосредственно у всасывающего патрубка. Оно дросселирует и одновременно закручивает поток в сторону вращения колеса. В результате изменения угла входа потока на колесо изменяется производительность машины. Направляющие аппараты бывают осевого и упрощенного типа.

Направляющий аппарат осевого типа имеет поворотные лопатки, оси которых выведены наружу и с помощью рычагов связаны с приводным кольцом, обеспечивающим поворот всех лопаток на одинаковый угол (рис. 2.14).

В положениях, близких к полному закрытию, изменение расхода газа или воздуха осуществляется в основном за счет дросселирования. В дальнейшем, по мере открытия и увеличения угла поворота лопаток, изменение расхода достигается частично дросселированием, а также изменением направления потока по отношению к лопастям рабочего колеса насоса, дымососа или вентилятора.

Направляющий аппарат упрощенного типа представляет собой многолопастную жалюзийную заслонку, которая устанавливается непосредственно перед всасывающим отверстием в корпусе машины.

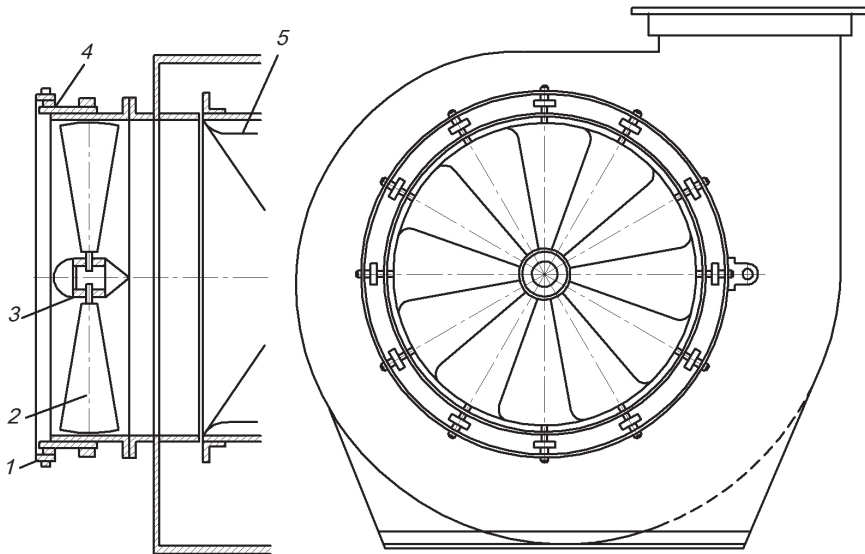


Рис. 2.14. Направляющий аппарат осевого типа:

1 — кольцевой приводной рычаг; 2 — поворотные лопатки; 3 — опора;
4 — приводные промежуточные рычаги; 5 — крыльчатка дымососа или вентилятора

На котлах, сжигающих твердое топливо, на дымососах, где вследствие износа золой лопатки требуют частой замены, применяют главным образом направляющие аппараты упрощенного типа, в то время как на вентиляторах чаще всего устанавливают более экономичные направляющие аппараты осевого типа.

Наиболее экономичным способом регулирования производительности является изменение числа оборотов машины с помощью гидравлических муфт или посредством изменения частоты вращения электропривода, которое в последнее время начинает все больше находить применение (частотное регулирование).

Сравнение экономичности рассмотренных выше способов регулирования производительности тягодутьевых машин показано на рис. 2.15, где N/N_p — относительное изменение мощности электропривода, Q/Q_p — относительное изменение расхода.

Рабочие расходные характеристики направляющих аппаратов (рис. 2.16) с точки зрения регулирования неблагоприятны, т. к. почти весь диапазон изменений расходов приходится лишь на первую половину хода направляющего аппарата. Поэтому для улучшения характеристики принимают диапазон регулирования в пределах поворота лопаток направляющего аппарата $10-70^\circ$.

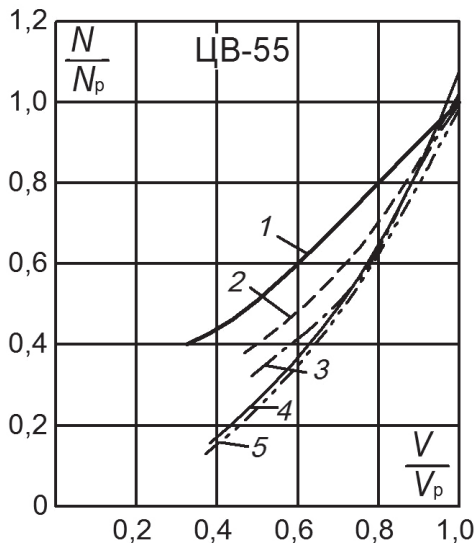


Рис. 2.15. Потребляемая мощность при различных способах регулирования:
 1 — дроссельное регулирование; 2 — направляющий аппарат упрощенного типа;
 3 — направляющий аппарат осевого типа; 4 — гидромуфта; 5 — реостат в цепи ротора асинхронного электродвигателя

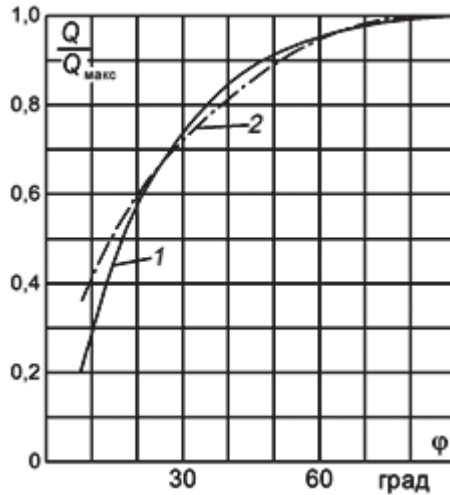


Рис. 2.16. Рабочие характеристики направляющих аппаратов:
1 — осевого типа; 2 — упрощенного типа

2.5. Сочленение регулирующих органов с исполнительными механизмами регуляторов

Существуют следующие виды сочленений регулирующих органов с исполнительными механизмами: рычажное, кулачковое, редукторное, тросовое.

Желательно, чтобы в промышленных автоматических системах рабочая характеристика регулирующего органа была линейной. Если нелинейность рабочей характеристики регулирующего органа неизбежна или неустранима, то она может быть компенсирована конструкцией сочленения.

Кинематическая схема рычажного сочленения с линейной характеристикой приведена на рис. 2.17, а, а с нелинейной статической характеристикой — на рис. 2.17, б. Статические характеристики этих сочленений приведены на рис. 2.17, в. Рычажные сочленения просты по конструкции и надежны в эксплуатации. Они применяются только в том случае, когда поворот выходного рычага исполнительного механизма 1 и приводного рычага 2 регулирующего органа можно осуществить в одной плоскости, и при условии, что угол поворота выходного рычага на 90° обеспечивает максимальное открытие регулирующего органа. Применение рычажного соединения ограничивается также расстоянием между исполнительным механизмом и регулирующим органом.

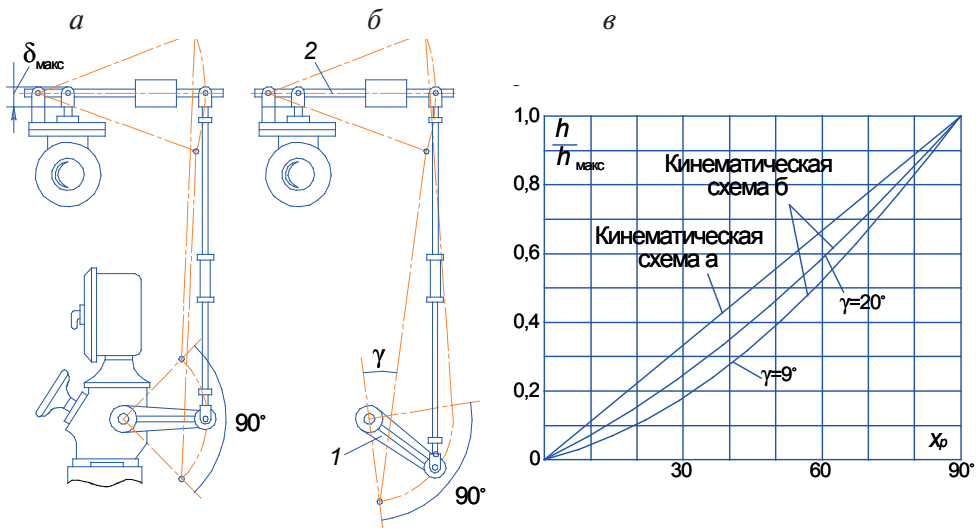


Рис. 2.17. Рычажное сочленение регулирующего органа с сервоприводом:
 а — с линейной характеристикой; б — с нелинейной характеристикой
 (1 — выходной рычаг исполнительного механизма, 2 — приводной рычаг);
 в — статические характеристики сочленений а и б

Кулачковое соединение (рис. 2.18) позволяет использовать сервоприводы с углом поворота выходного вала до 360° , при этом плоскости вращения кулачка и приводного рычага регулирующего органа могут не совпадать.

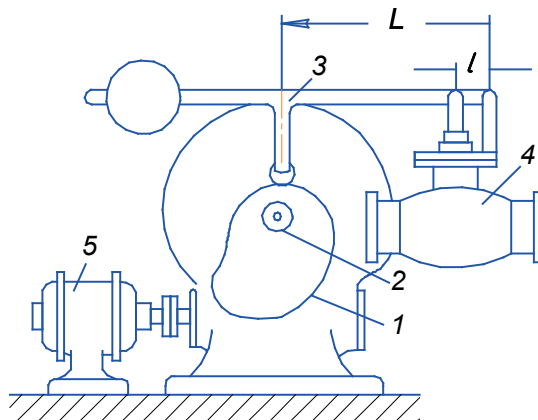


Рис. 2.18. Кулачковое сочленение:
 1 — кулачок; 2 — выходной вал сервопривода; 3 — приводной рычаг;
 4 — клапан; 5 — электродвигатель

Существенным преимуществом кулачкового соединения является возможность изменения характеристик сочленения в широких пределах путем различного профилирования кулачка, что позволяет добиться линейности рабочей характеристики регулирующего органа. Кулачковые сочленения применяют при сравнительно небольших перестановочных усилиях и совместном расположении исполнительного механизма и регулирующего органа.

Редукторное сочленение электрического исполнительного механизма с регулирующим органом применяется, если требуются большие перестановочные усилия при перемещениях регулирующего органа (или запорного органа), например, при регулировании питания водой котлов большой мощности и высокого давления. Угол поворота выходного вала редуктора, понижающего число оборотов, практически не ограничен (МИМ — многооборотные исполнительные механизмы), его передаточные характеристики линейны. Редукторный привод жестко связан с местом расположения регулирующего органа.

Тросовое соединение позволяет в случае необходимости устанавливать исполнительный механизм на более значительном расстоянии от регулирующего органа по сравнению с рычажным, но все же это расстояние также ограничено. Угол поворота выходного вала исполнительного механизма при тросовом соединении может изменяться $1-270^\circ$. Повороты диска, укрепленного на выходном валу, и приводного рычага регулирующего органа могут совершаться в различных плоскостях.

Требуемую расходную характеристику регулирующего органа при тросовой связи можно осуществлять, изменяя профиль приводного диска.

2.6. Регулирующие органы топливоподающих устройств

Регулирование газообразного и жидкого топлива, поступающего в топку различных агрегатов, осуществляется с помощью клапанов и поворотных дроссельных заслонок. Если же для сжигания используется твердое топливо (каменный уголь, торф, сланец), то для регулирования его подачи и изменения расхода применяются питатели топлива.

Питатели твердого топлива используются в качестве топливоподающих устройств барабанных и молотковых мельниц.

Схема тарельчатого питателя (рис. 2.19) состоит в следующем.

Предварительно раздробленное топливо из бункера через цилиндрическую трубу 1 поступает на вращающийся диск (тарелку) 2 и сбрасывается с него поворотным ножом 3 в отводящую течку 4.

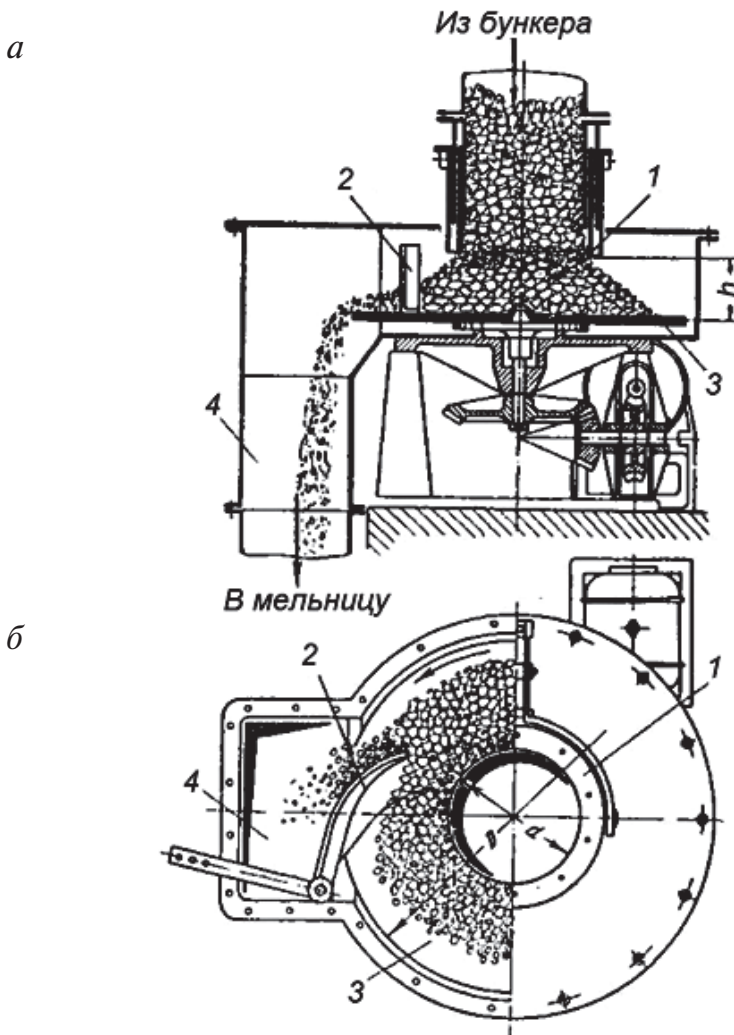


Рис. 2.19. Тарельчатый питатель сырого угля:

a — вид сбоку; *б* — вид сверху:

1 — цилиндрическая труба; 2 — поворотный диск; 3 — диск; 4 — течка

Изменение количества топлива, сбрасываемого в мельницу, можно регулировать тремя способами:

- 1) высотой положения приемной трубы 1 над рабочим диском 2, который используется для первоначальной установки высоты расположения трубы над тарелкой в зависимости от угла естественного откоса сырого топлива;
- 2) углом поворота ножа 3, открывающего топливу доступ в течку, который используется при индивидуальном регулировании производительности мельницы. В этом случае изменение положения ножа осуществляется с помощью исполнительного механизма, сочлененного с поворотной осью ножа;
- 3) изменением числа оборотов тарелки 2, которое целесообразно использовать при групповом регулировании производительности нескольких мельниц.

Тарельчатые питатели рассчитаны на расходы сырого топлива 5–30 т/ч.

Достоинством тарельчатых питателей является их компактность, незначительные присосы воздуха и широкий диапазон регулирования. Основным недостатком является то, что топливо повышенной влажности начинает проскальзывать по диску, в результате чего подача топлива может резко падать. По этой причине тарельчатые питатели не применяются при влажности топлива выше 30–33%. Тарельчатые питатели обычно устанавливаются в системах пылеприготовления с промежуточным бункером, где нестабильность топливоподачи в мельницы не приводит к глубоким нарушениям топочного режима парогенераторов.

Ленточный питатель применяется обычно тогда, когда предусмотрена установка весов, контролирующих расход топлива (рис. 2.20). Регулирование подачи топлива можно осуществлять двумя способами:

- 1) изменением толщины слоя топлива, которое чаще всего применяется при индивидуальном управлении производительностью мельницы;
- 2) изменением скорости движения ленты (0,1–0,35 м/с) при групповом управлении производительностью мельниц.

Регулирование толщины подачи слоя топлива производится секторным затвором или шибером при выходе из бункера. Максимальную высоту слоя топлива принимают обычно равной 10–15 см. Если шибер или затвор опущены слишком низко, то в образовавшейся узкой щели будут застревать отдельные более крупные куски, нарушая

равномерную подачу топлива. В зависимости от качества предварительного дробления угля принимают минимальную толщину слоя топлива 30–40 мм, чем и определяется нижний диапазон регулирования подачи топлива питателем.

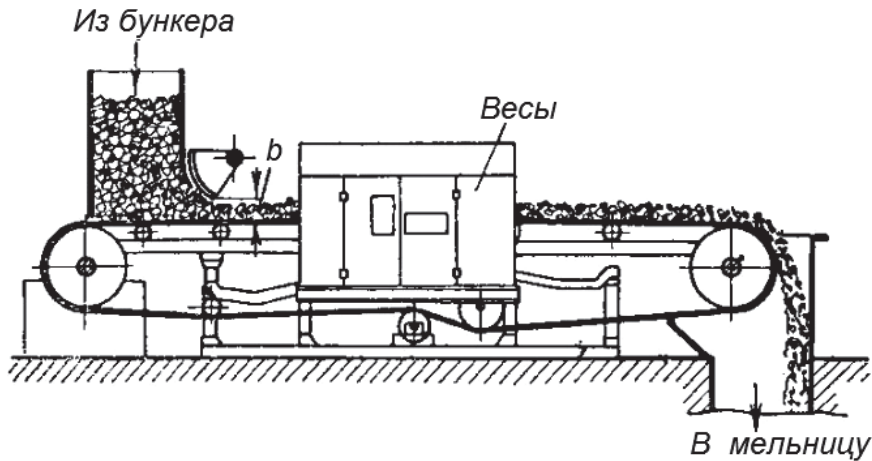


Рис. 2.20. Ленточный питатель сырого угля

При хорошем дроблении угля ленточные питатели обеспечивают в пределах регулируемого диапазона линейную и достаточно стабильную рабочую характеристику.

Питатели типа ленточного устанавливаются для индивидуального регулирования производительности шаровых барабанных мельниц и группового регулирования молотковых мельниц.

Скребокковый питатель может применяться при любых видах твердого топлива, но наиболее целесообразно его использовать для транспорта влажных углей и фрезерного торфа. Принцип действия скребоккового питателя показан на рис. 2.21. Средством регулирования подачи топлива при индивидуальном управлении служит, как и у ленточного питателя, перемещение шибера. При групповом управлении используют изменение числа оборотов приводного двигателя (скорости перемещения топлива). Минимальная толщина слоя в нижнем положении шибера должна составлять 30–50 мм. По этой толщине слоя, а также по количеству топлива, перемещаемого между звеньями цепи, определяется нижний предел регулирования подачи топлива, составляющий 25–30 % максимальной производительности питателя.

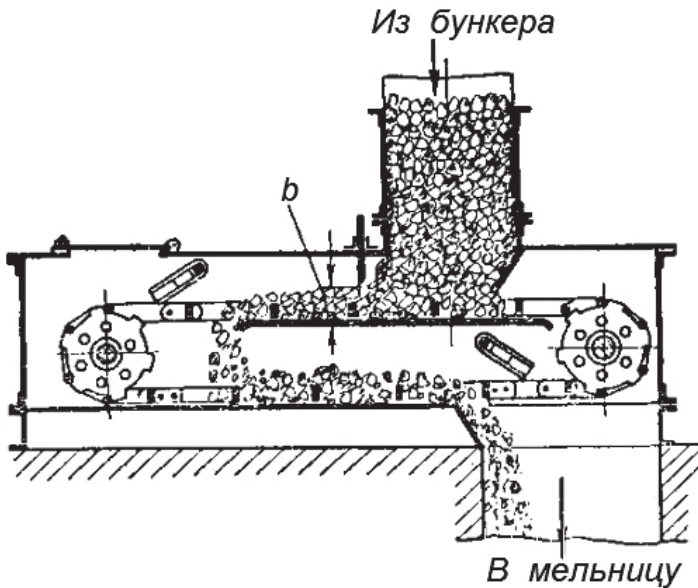


Рис. 2.21. Скребковый питатель сырого угля

Скребковый питатель имеет линейную расходную характеристику, стабильность которой зависит от качества предварительного дробления топлива.

Для регулирования подачи пыли в топку котлов применяют следующие виды питателей: шнековый питатель, дисковый лопастной питатель и аэрационный питатель.

Шнековый питатель (рис. 2.22) действует по принципу винта. Винт, называемый шнеком, остается на месте, а перемещается сыпучая среда, в которой он вращается.

Пыль из промбункера *1* через отсечной шибер *2* непрерывно поступает в приемный патрубок питателя *4*, проталкивается винтовой лопастью шнека *3* до выходного патрубка и стекает через течку *5* в пылепровод *6*, где она подхватывается потоком воздуха Q_B и транспортируется до горелки *7*, через которую и поступает в топку. Производительность питателя регулируется числом оборотов шнека.

Для этой цели используется электропривод с регулируемым числом оборотов, как правило, двигатель постоянного тока δ , который связывается с валом шнека ременной передачей *9*. Для предотвращения образования сводов над входной горловиной питателя можно устанавливать «воршитель» *10*.

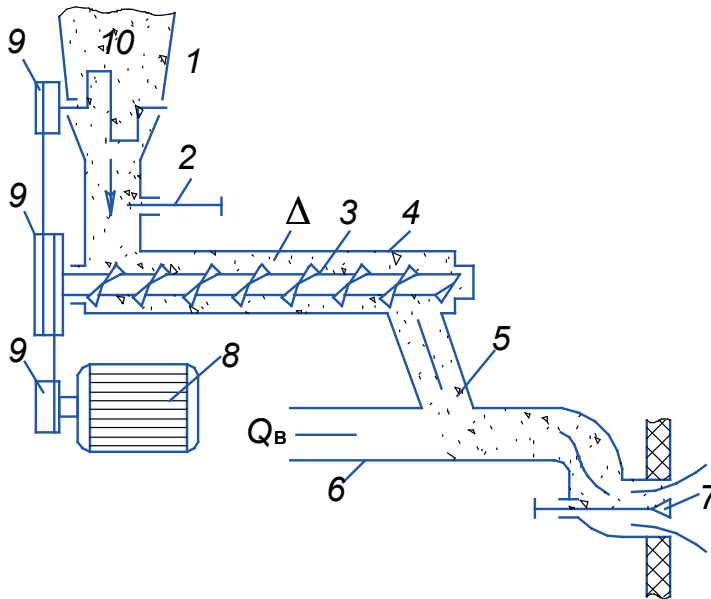


Рис. 2.22. Шнековый питатель пыли:

1 — промбункер; 2 — отсечной шибер; 3 — шнек; 4 — приемный патрубок питателя; 5 — течка; 6 — пылепровод; 7 — горелка; 8 — электродвигатель; 9 — ременная передача; 10 — ворошитель

Диапазон изменения числа оборотов n электропривода 450–1350 об/мин. Поскольку электропривод имеет начальное число оборотов (450 об/мин), шнековый питатель обладает нерегулируемой начальной производительностью (до 30 % от максимальной).

Рабочая характеристика шнекового питателя может изменяться в зависимости от тонины помола пыли, ее влажности и высоты столба пыли над приемным патрубком.

Некоторое количество пыли может попадать в топку при остановленном питателе за счет эжектирующего действия потока воздуха в пылепроводе из-за протекания пыли через зазоры между лопатками шнека 3 и корпусом питателя 4. Это происходит при сухой и тонкой пыли, обладающей высокой текучестью (при влажности менее 12–14 %).

Работа лопастного питателя показана на рис. 2.23. Питатель состоит из двух вращающихся дисков с укрепленными на них лопастями. Пыль из бункера, приводимая в движение ворошителем 2, поступает в приемную горловину 1, а оттуда через окно в верхней перегородке 3 в ячейку между лопастями вращающегося диска 4, которым она перемещается

на другой край средней перегородки, проваливается через окно в ячейки между лопастями нижнего диска 5 и переваливается ими на правый край нижней перегородки, откуда она проваливается через окно в течку 6, соединяющую питатель пыли с пылепроводом. Путь, совершаемый сыпучей массой за один оборот, показан на рис. 2.23 стрелками.

Производительность дискового питателя регулируется числом оборотов электропривода с редуктором, на выходном валу которого укреплены вращающиеся диски. Диапазон регулирования питателя по числу оборотов $n = 450 \dots 1350$ об/мин.

Для пылеугольных горелок мощных парогенераторов можно использовать аэрационные питатели пыли (рис. 2.24).

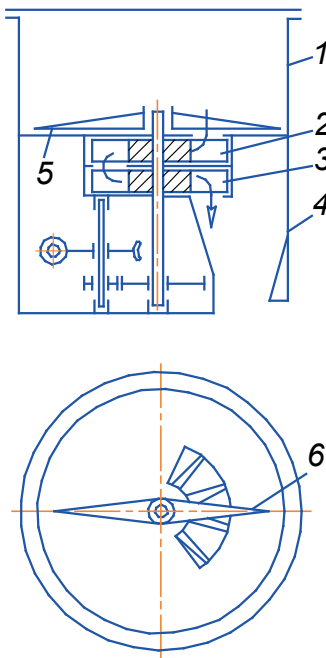


Рис. 2.23. Дисковой питатель пыли

- 1 — приемная горловина;
2 — ворошитель;
3 — верхняя перегородка;
4 — вращающийся диск;
5 — нижний диск; 6 — течка

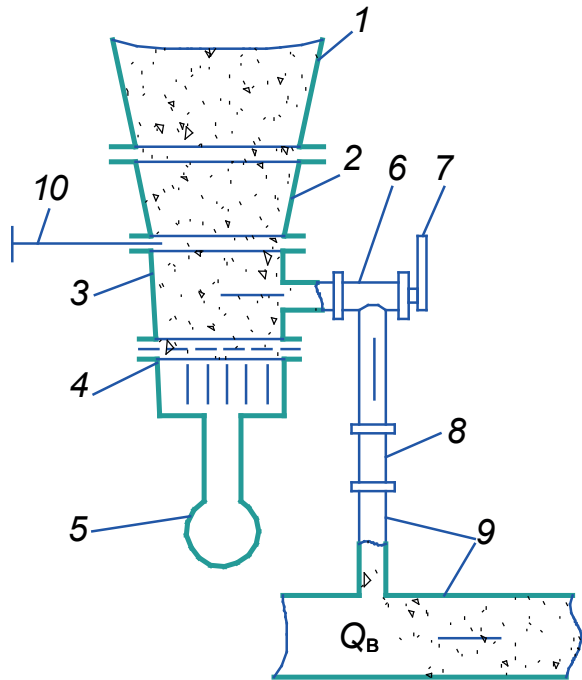


Рис. 2.24. Аэропитатель пыли:

- 1 — бункер; 2 — переходный патрубок эллиптического сечения; 3 — рабочая камера; 4 — распределительная решетка; 5 — трубопровод сжатого воздуха; 6 — регулирующий клапан; 7 — приводной рычаг; 8 — сужающее устройство для измерения расхода пыли; 9 — пылепроводы; 10 — отсечной шибер; $Q_{\text{в}}$ — расход первичного воздуха на горелку

Основной частью аэропитателя служит цилиндрическая рабочая камера, в которую через газораспределительную решетку, обеспечивающую равномерность дутья, поступает снизу сжатый воздух, а сверху через присоединительный патрубок 2 угольная пыль из бункера. В рабочей камере при скоростях истечения воздуха порядка 0,01 м/с и более наступает режим полного ожигения пыли, находящейся в камере. Образованная аэрозмель через течку поступает в пылепровод, и далее потоком воздуха с расходом Q_v пыль транспортируется к горелке. Производительность питателя регулируется посредством поворотного (или какого-либо другого) клапана, установленного на входе в течку. Диапазон плавного регулирования подачи пыли составляет примерно 1:5. Неравномерность подачи питателя не превышает (± 6)%. Аэропитатели, в отличие от шнековых и дисковых, не имеют электропривода и вращающихся частей, просты в обслуживании и ремонте.

Изменение подачи сырого угля и пыли осуществляется путем изменения числа оборотов питателей. Существует два способа изменения числа оборотов: ступенчатое и бесступенчатое, т. е. бесконтактное (плавное) регулирование.

Ступенчатое регулирование производительности питателей сырого топлива и пыли при групповом управлении осуществляется с помощью электрической системы управления электроприводом, когда в качестве привода используется шунтовой двигатель постоянного тока, число оборотов которых регулируется реостатом в цепи обмотки возбуждения (рис. 2.25).

Последовательно с обмоткой возбуждения 2 включается регулировочный реостат 9 и реостат ручного управления 1. Изменение сопротивления реостатов в конечном итоге приводит к изменению числа оборотов двигателя. При полностью введенном сопротивлении реостатов двигатель вращается с максимальной скоростью, при выведенном — с минимальной.

Для обеспечения равномерности изменения производительности отдельных питателей подвижные контакты регулировочных реостатов имеют общий привод — траверсу 6. Траверса управляется собственным сервоприводом 3 с редуктором 4, который включается в цепь автоматического или дистанционного управления подачей топлива.

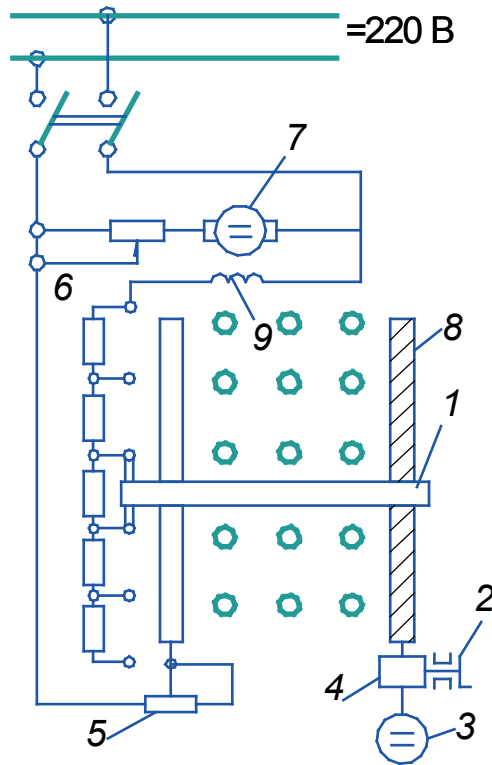


Рис. 2.25. Принципиальная электрическая схема группового регулирования числа оборотов питателей пыли (система ступенчатого регулирования с помощью плоского контроллера):

1 — индивидуальный реостат регулирования числа оборотов; 2 — обмотка возбуждения; 3 — электропривод траверсы; 4 — редуктор; 5 — ручной привод траверсы; 6 — траверса плоского контроллера; 7 — винтовой привод траверсы; 8 — шунтовой двигатель; 9 — сопротивление группового реостата в цепи обмотки возбуждения

Конструктивно весь узел управления электродвигателями питателей топлива выполняется в виде самостоятельной установки — станции управления питателей топлива, включающей плоский контроллер с траверсой 6, шунтовые реостаты, реостаты ручного управления и сервопривод траверсы 3. Помимо дистанционного и автоматического управления, траверса имеет приспособление для ручного перемещения (ручку 5 и винтовой привод 7).

Выпускались два вида станций питателей топлива: станция шахтных мельниц (СШМ) для питателей сырым углем шахтных мельниц и станция питателей пыли (СПП) для питателей пыли.

Системы автоматического бесступенчатого и бесконтактного регулирования обеспечивают плавное изменение числа оборотов питателей пыли (АРПП) или питателей сырого угля (АРСП). Они применяются для управления электродвигателями, питающимися от сети переменного тока через преобразователи, которые состоят из мощного выпрямителя, преобразующего переменный ток в постоянный, и дросселя насыщения, воздействием на управляющие обмотки которого обеспечивается регулирование напряжения на выходе выпрямителя. Регулирование числа оборотов электродвигателей питателей топлива при постоянном напряжении на обмотках возбуждения осуществляется за счет изменения напряжения на якорях электродвигателей, которые подключены к выходу выпрямителей.

На одном котельном агрегате в зависимости от количества пылепитателей может быть установлено несколько дроссельных преобразователей.

В заключение следует отметить, что хорошо отлаженные и надежные регулирующие органы со стабильными рабочими характеристиками являются важнейшей предпосылкой надежной и эффективной работы систем автоматического управления.

ГЛАВА 3. Автоматизация паровых барабанных котлов

3.1. Участки регулирования барабанного парового котла

В энергетике используется и выпускается большой спектр паровых котлов, различающихся по назначению, производительности, параметрам пара, способу циркуляции воды, конструктивному оформлению и т. п.

По назначению паровые котлы делятся на энергетические (котлы средних и больших давлений и большой производительности), промышленные (котлы малых и средних давлений, малой и средней производительности), отопительные (для производства пара и горячей воды для систем теплоснабжения), утилизационные (котлы-утилизаторы, использующие для производства пара теплоту вторичных энергоресурсов), энерготехнологические (используют теплоту вторичных энергоресурсов — продуктов технологической переработки каких-либо материалов) и др.

По давлению различают котлы низкого давления (до 1,4 МПа), среднего (4–10 МПа), высокого (14 МПа), сверхвысокого давления (18–20 МПа) и сверхкритического давления (больше 22,5 МПа).

По производительности различают котлы малой производительности (до 25 т/ч), средней (25–200 т/ч) и большой производительности (более 200 т/ч), к которым относятся котлы энергетические.

По способу циркуляции воды котлы подразделяются на котлы с естественной циркуляцией (барабанные паровые котлы низкого, среднего и высокого давления), многократной принудительной цир-

куляцией (котлы-утилизаторы) и прямоточные котлы (котлы сверхвысокого и сверхкритического давления).

Котлы большой мощности (давление перегретого $p_{\text{пн}} \geq 10$ МПа, температура перегретого пара $t_{\text{пн}} \approx 545...565$ °С и производительность $D_{\text{пн}} = 200...2500$ т/ч) — это энергетические котлы (их называют парогенераторы), используются на тепловых электростанциях.

Котлы средней мощности ($p_{\text{пн}} \geq 4...10$ МПа; $t_{\text{пн}} \approx 440$ °С; $D_{\text{пн}} = 35...200$ т/ч) относятся к промышленным котлам и устанавливаются на ТЭЦ.

Котлы малой мощности (с давлением пара $p_{\text{пн}} \leq 1,4$ МПа; производительностью $D_{\text{пн}} < 35$ т/ч) имеют на выходе или насыщенный пар, или слабоперегретый $t_{\text{пн}} \approx 225...250$ °С, относятся к производственно-отопительным котлам и используются в паровых или пароводогрейных котельных.

Паровые котлы различаются не только по вышеприведенным признакам, но и по конструкции, видам и способу сжигания топлива (газ, мазут, твердое топливо).

Конструктивные особенности котлов, которые необходимо учитывать при выполнении упрощенных технологических схем и автоматизации, следующие:

1) котлы большой мощности имеют в своем составе сложный пароперегреватель, включающий радиационную, радиационно-конвективную и конвективную части, разделенные пароохладителями впрыскивающего типа; имеют двухступенчатые экономайзеры и воздухоподогреватели;

2) котлы средней мощности имеют в своем составе также все поверхности нагрева — конвективный пароперегреватель с пароохладителем поверхностного или впрыскивающего типа, одно- или двухступенчатую компоновку экономайзера и воздухоподогревателя;

3) котлы малой мощности имеют не все поверхности нагрева. В них нет пароперегревателя (на выходе имеем насыщенный пар) или некоторые котлы имеют пароперегреватель для слабого нерегулируемого перегрева пара ($t_{\text{пн}} = 225$ °С или 250 °С). В этих котлах нет воздухоподогревателя, имеется чугунный экономайзер, который вынесен за пределы котла.

Такое многообразие существующего парка котлов не позволяет создать какую-либо единую систему автоматического управления их работой. Однако для барабанных паровых котлов с естественной цир-

куляцией можно выделить некоторые общие потоки, присущие этим котлам, определить основные каналы регулирующих воздействий и осуществить регулирование основных параметров по отдельным одноконтурным системам.

Рассмотрим основные участки регулирования барабанного парового котла на примере котла средней мощности, имеющего все поверхности нагрева: испарительную часть, конвективный пароперегреватель, экономайзер и воздухоподогреватель. Упрощенная схема котла представлена на рис. 3.1.

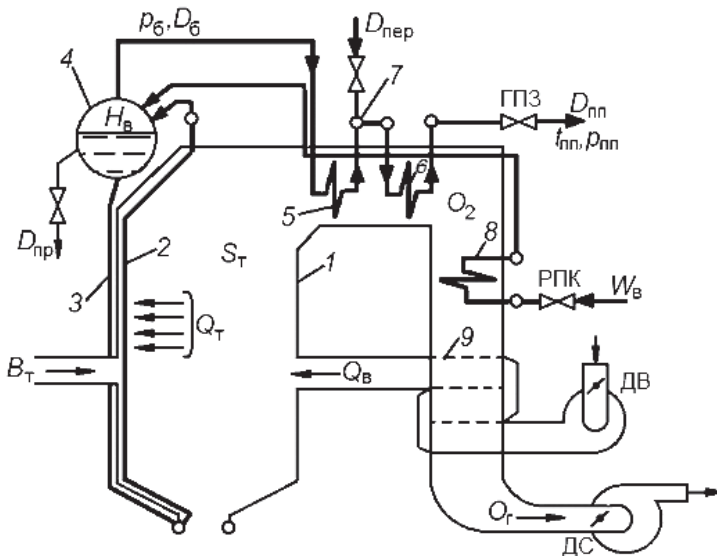


Рис. 3.1. Барабанный парогенератор
(принципиальная технологическая схема):

ГПЗ — газовая паровая задвижка; РПК — регулировочный питательный клапан;
ДВ — дутьевой вентилятор; ДС — дымосос; 1 — топка; 2 — подъемные трубы;
3 — опускные трубы; 4 — барабан котла; 5, 6 — 1-я и 2-я ступени пароперегревателя;
7 — пароохладитель; 8 — экономайзер; 9 — воздухоподогреватель

Процесс парообразования происходит в подъемных трубах 2 циркуляционного контура, снабжающихся водой из опускных труб 3 и экранящих топочную камеру 1, в которой сжигается топливо с расходом V_t . Для поддержания процесса горения в топку подается воздух с расходом Q_v с помощью вентилятора D_v , предварительно подогретый в воздухоподогревателе 9.

Образовавшиеся в результате процесса горения продукты сгорания (дымовые газы) отсасываются из топки с расходом Q_r дымососом ДС, проходят через поверхности нагрева пароперегревателя 5, 6, водяного экономайзера 8 и воздухоподогревателя 9. Насыщенный пар с расходом D_6 отводится из барабана котла, поступает в пароперегреватель 5, 6 и подогревается до требуемой температуры $t_{пп}$ за счет излучения и конвективного теплообмена.

Питательная вода с расходом W_v поступает в водяной экономайзер 8, в котором нагревается за счет излучения и конвективного теплообмена от дымовых газов до определенной температуры и направляется в барабан котла 4. Вместе с питательной водой в испарительный контур котла поступают соли. Часть накапливающихся в котловой воде солей отводится непрерывной продувкой с расходом $D_{пр}$.

Парообразование происходит в подъемных трубах котла за счет подвода тепла от высокотемпературного факела Q_r , выделяющегося при сжигании топлива в топке.

Основными регулируемыми величинами котла являются расход перегретого пара $D_{пп}$, его давление $p_{пп}$ и температура $t_{пп}$. Перегретый пар направляется потребителю, который может изменять расход пара $D_{пп}$. Следовательно, переменной величиной для котла является расход пара, а его давление и температура должны поддерживаться в пределах допустимых отклонений, которые определяются в соответствии с требованиями заданного режима работы потребителя (турбины или иного потребителя тепловой энергии пара).

Заданное значение температуры пара $t_{пп}$ может поддерживаться посредством изменения расхода охлаждающей воды $D_{впр}$ на пароохладитель 7.

Давление перегретого пара $p_{пп}$ и давление в барабане котла p_6 изменяется во всех случаях возникновения небаланса между количеством потребляемого пара $D_{пп}$ и генерируемого (вырабатываемого) в экранных трубах D_6 и может поддерживаться посредством изменения тепловыделения в топке Q_r , т. е. главным образом изменением подачи топлива.

Кроме поддержания требуемого расхода пара $D_{пп}$ и заданных значений $p_{пп}$ и $t_{пп}$ следует поддерживать в пределах допустимых отклонений следующие величины: уровень воды в барабане котла H_v , разрежение в верхней части топки S_r , солесодержание котловой воды, оптимальный расход воздуха на сжигание топлива.

Вышеперечисленные величины изменяются в результате регулирующих воздействий и под действием внешних и внутренних возмущений, носящих закономерный или случайный характер, таких как колебания расхода пара, качество и расход топлива, температура питательной воды, нарушение плотности топки и т. п. Из этого следует, что паровой котел как объект регулирования в целом представляет собой сложную динамическую систему с целым рядом взаимосвязанных входных и выходных величин (рис. 3.2).

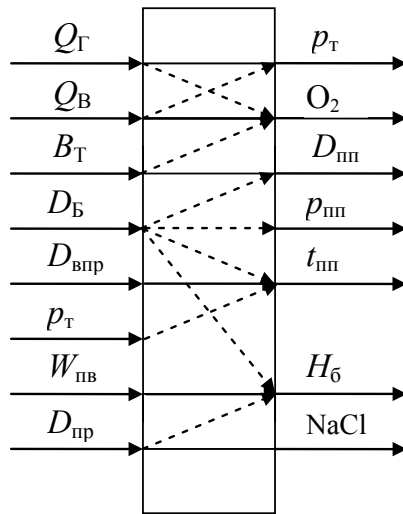


Рис. 3.2. Схема взаимосвязей между выходными и входными величинами в барабанном парогенераторе

Сложность взаимосвязей состоит в том, что некоторые входные величины, напрямую влияя на выходные величины, косвенно влияют на другие выходные параметры. Это косвенное влияние трудно бывает учесть. Например, изменение расхода топлива B_T напрямую (сплошная линия) влияет на расход перегретого пара $D_{пп}$ и в то же время влияет на содержание свободного кислорода в дымовых газах O_2 и давление перегретого пара $p_{пп}$; расход воды на впрыск $D_{впр}$ напрямую влияет на температуру перегретого пар $t_{пп}$, на которую также влияет расход пара из барабана котла $D_б$ и разрежение в топке S_t ; расход перегретого пара $D_{пп}$, являясь выходной величиной по отношению к расходу топлива B_T , служит входной величиной (воздействием) по отношению к давлению $p_{пп}$ и температуре $t_{пп}$ перегретого пара и т. д.

Однако явно выраженная направленность участков регулирования котла по основным каналам регулирующих воздействий, таких как расход питательной воды $W_{\text{в}}$ → уровень воды в барабане H_6 , расход топлива $B_{\text{т}}$ → давление $p_{\text{пп}}$ и др., позволяет осуществлять стабилизацию регулируемых величин с помощью независимых одноконтурных систем, связанных лишь через объект регулирования. При этом регулирующее воздействие того или иного участка (сплошные линии на рис. 3.2) служат основным способом стабилизации его регулируемой величины, а другие воздействия (пунктирные линии) являются по отношению к этому участку внутренними или внешними возмущениями.

Хорошее знание технологии работы теплоэнергетического оборудования, рассмотрение входных и выходных потоков его отдельных участков (объектов) и определение того основного параметра, который будет изменяться при возникновении небаланса между этими потоками (динамический переходный режим работы) позволяет составлять необходимые структурные схемы систем регулирования без составления дифференциальных уравнений объектов.

В автоматике широко используются упрощенные технологические схемы оборудования, на которых показаны все входные и выходные потоки, все регулирующие органы и только то оборудование, которое необходимо для понимания работы технологии. Технологическая схема не обязательно должна повторять геометрические контуры оборудования. Это удобно тем, что схема не затенена дополнительным оборудованием, не относящимся к автоматике, ее просто читать и выявлять необходимые для рассмотрения потоки и регулируемые параметры. Кроме того, при таком представлении технологической схемы проще и удобнее составлять функциональные схемы автоматизации оборудования.

Используем такой подход при рассмотрении автоматизации барабанного парового котла средней мощности (рис. 3.1).

Упрощенная технологическая схема котла представлена на рис. 3.3.

Паровой котел в целом можно рассматривать как объект регулирования тепловой нагрузки, поступающей к потребителю в виде расхода пара $D_{\text{пп}}$ с параметрами $p_{\text{пп}}$ и $t_{\text{пп}}$. С паром из котла уходит тепловая нагрузка (расход тепла), а входит теплота с расходом топлива $B_{\text{т}}$, которая выделяется при его сжигании в топке.

Вышеперечисленные регуляторы (РТН, РОВ и PS_T) обеспечивают нормальный процесс горения топлива в топке в динамических и статических режимах работы котла.

В динамических режимах работы изменяются основные параметры ($D_{пп}$, $p_{пп}$) и приводят к изменению уровня воды в барабане котла H_6 , который должен изменяться в узких пределах. Необходим регулятор уровня воды в барабане (PH_6), который управляет подачей питательной воды на котел W_v .

Вместе с питательной водой в испарительную систему поступают соли, незначительная часть которых уносится с паром. В испарительной системе будет происходить накопление солей, содержание которых сверх допустимого предела нежелательно, т. к. приводит к аварийным режимам работы котла. Необходимо установить регулятор солесодержания котловой воды ($PSKB$), который управляет величиной непрерывной продувки котла $D_{пр}$.

Потребителями подогретого пара в основном являются паровые турбины, реже — какие-либо производства, для которых пар должен иметь постоянную (с небольшими отклонениями) температуру, что требует установки регулятора температуры перегретого пара (p , $t_{пп}$), управляющего подачей воды на впрыск в пароохладители $D_{впр}$.

Паровые котлы чаще всего работают на общую паровую магистраль, из которой пар распределяется по потребителям (котельные, ТЭЦ) или, что реже, по индивидуальным потребителям (например, блок «котел — турбина» на крупных тепловых электростанциях).

При работе на общую паровую магистраль тепловая нагрузка котлов, работающих в регулирующем режиме, распределяется между ними главным корректирующим регулятором (ГКР), который управляет работой регуляторов тепловой нагрузки (РТН) котлов.

Системы регулирования в самом простом варианте строятся по схеме: определяется регулируемая величина, которую нужно стабилизировать, регулирующий прибор управления (каким потоком необходимо управлять). После этого строится упрощенная структурная схема регулятора, в которой не будут показаны некоторые дополнительные устройства при его технической реализации (переключатель управления, ключ управления, указатель положения и магнитный пускатель).

Рассмотрим схемы построения вышеперечисленных регуляторов.

3.2. Регулирование тепловой нагрузки котла (расхода топлива)

Схемы регулирования тепловой нагрузки котла зависят от мощности котла, режима его работы (базовый или регулирующий), вида сжигаемого топлива. Котел рассматривается как объект регулирования тепловой нагрузки, в котором имеется приток теплоты (с топливом) и ее расход (с перегретым паром) к потребителю. Полезно использованная теплота в установившемся режиме работы (статический режим) определяется по уравнению теплового баланса

$$B_T Q_H^p \eta_{ка} = D_{пп} (i_{пп} - i_{пв}) + D_{пр} (i' - i_{пв}), \quad (3.1)$$

где B_T — расход топлива; Q_H^p — низшая теплота сгорания топлива; $\eta_{ка}$ — КПД котла; $D_{пп}$ и $D_{пр}$ — расходы перегретого пара и продувочной воды; $i_{пп}$, i' и $i_{пв}$ — энтальпии перегретого пара, воды при температуре кипения и питательной воды соответственно. Поскольку расход продувочной воды $D_{пр}$ мал, составляет 2–5 % от расхода пара [$D_{пр} \approx (0,02 \dots 0,05) \times D_{пп}$], то теплоту, уходящую с продувочной водой, можно не учитывать и рассматривать приближенный баланс.

Из уравнения (3.1) следует, что при нарушении теплового баланса потребителем (например, изменяет расход пара $D_{пп}$) единственным способом восстановить баланс является изменение притока теплоты в топке путем изменения расхода топлива B_T .

Нарушение теплового баланса котла происходит за счет внутренних и внешних возмущений. К внутренним относятся возмущения, связанные с самопроизвольным изменением характеристик топлива (теплота сгорания и его расхода — левая часть уравнения (3.1)). К внешним относятся возмущения, связанные с изменением количества потребляемого пара. В этом случае паропроизводительность котла не будет соответствовать количеству потребляемого пара. Показателем этого несоответствия являются изменения давления пара в какой-либо точке парового котла (например, давление в общей магистрали p_m или давление в барабане p_6).

Следовательно, система автоматического регулирования тепловой нагрузки должна компенсировать внутренние и внешние возмущения с помощью одного управляющего воздействия — расхода топлива.

Как правило, в котельных и на тепловых станциях несколько паровых котлов работают на общую паровую магистраль, из которой пар распределяется по потребителям. В таком случае паровая магистраль представляет собой объект регулирования давления пара в магистрали.

Способы и схемы автоматического регулирования тепловой нагрузки котла и давления в магистрали определяются в соответствии с заданным режимом его работы (базовым или регулирующим) и видом сжигаемого топлива. В базовом режиме тепловая нагрузка котла поддерживается на заданном уровне вне зависимости от общей тепловой нагрузки котельной или станции. В регулирующем режиме котел воспринимает колебания тепловой нагрузки котельной или тепловой и электрической нагрузки турбин на станциях, т. е. он участвует в регулировании общей тепловой (и электрической) нагрузки котельной или станции.

При построении схемы автоматического регулирования тепловой нагрузки парового котла, управляющего подачей топлива, необходимо измерить тепловую нагрузку, а это зависит от вида сжигаемого топлива.

1) Топливо — природный газ или мазут определенной марки со стабильными характеристиками. Полезное тепло, выделившееся при сжигании топлива, определяется в соответствии с левой частью уравнения (3.1).

$$Q_{\text{пол}} = B_{\text{т}} Q_{\text{н}}^{\text{п}} \eta_{\text{ка}}.$$

Теплота сгорания природного газа или мазут определенной марки, а также КПД котельного агрегата несущественно изменяются, т. е. можно принять, что $Q_{\text{н}}^{\text{п}}$ и $\eta_{\text{ка}}$ постоянны, тогда тепловая нагрузка котла будет зависеть только от расхода топлива, которое можно измерить. Расход природного газа $B_{\text{г}}$ достаточно точно измеряется стандартными сужающими устройствами (диафрагмы), а расход мазута $B_{\text{м}}$ может быть измерен, например, путем установки диафрагмы «четверть круга» или с помощью турбинных счетчиков (мазут для стабилизации его гидродинамических и теплофизических характеристик подается подогретым и должен иметь постоянную температуру).

В таком случае регулятор тепловой нагрузки (РТН) называют регулятором топлива, его строят по схеме (рис. 3.4). Эта схема используется на котлах различной мощности.

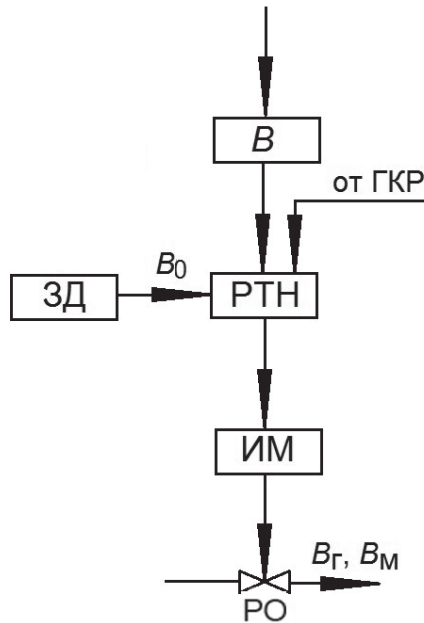


Рис. 3.4. Структурная схема РТН при работе на газе или мазуте:
 В — датчик расхода газа или мазута; ЗД — задатчик; V_0 — заданное значение расхода; ИМ — исполнительный механизм; РО — регулирующий орган;
 ГКР — сигнал от главного корректирующего регулятора

При работе на природном газе регулятор управляет заслонкой (РО) на подаче газа, а при работе на мазуте — регулирующим клапаном.

Без сигнала от главного корректирующего регулятора ГКР котел будет работать в базовом режиме работы, стабилизируя давление пара путем стабилизации расхода топлива. В этом случае регулятор называют стабилизирующим. Для работы в регулирующем режиме на регулятор необходимо подать сигнал от ГКР, который будет дополнительно изменять задание регулятором топлива, изменяя тепловую нагрузку котла.

Зачастую в мазутные баки подают топливо различного состава (мазуты разных марок, иногда дизельное топливо и т. п.), в связи с чем характеристики сжигаемого топлива изменяются и нет возможности достаточно точно измерить расход топлива, т. е. нет возможности точно определить тепловую нагрузку. В таком случае тепловую нагрузку измеряют косвенным способом.

При сжигании пылевидного топлива также нет возможности измерить тепловую нагрузку (непостоянство состава угольного топли-

ва, нестабильность работы пылепитателей и т. п.), поэтому она также измеряется косвенным способом.

2) Косвенный способ измерения тепловой нагрузки. Этот способ вытекает из рассмотрения динамики испарительной части котла (рис. 3.5).

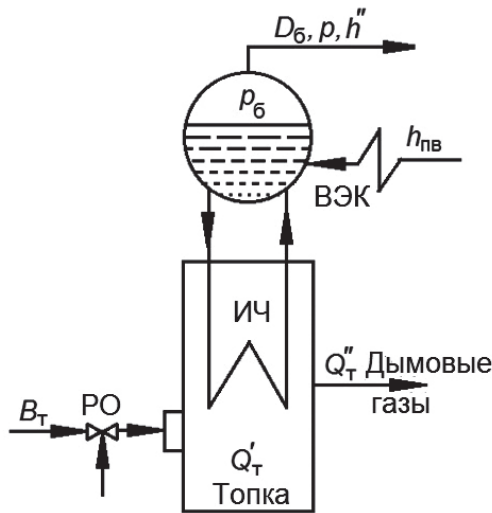


Рис. 3.5. Схема испарительной части котла
(ИЧ — испарительная часть котла)

Полезное тепло, выделившееся в топке, расходуется на испарение воды и получение насыщенного пара (Q'_T) и на перегрев пара, нагрев воды в экономайзере и воздуха (Q''_T). Изменение тепловыделения в топке приводит к изменению паропроизводительности котла D_6 и давления пара в барабане p_6 . Если увеличение расхода топлива B_T и тепловыделение идет целиком на нагрев пароводяной смеси и металла паробразующей части, то скорость изменения давления p_6 будет прямо пропорциональна теплу, затраченному на нагрев пароводяной смеси, или разности между подводимым теплом к испарительной части (Q'_T) и отводимым с паром. Уравнение динамики испарительной части котла как объекта регулирования давления пара в барабане p_6 будет

$$A \frac{dp_6}{dt} = Q'_T - D_6 (i'' - i_{пв}), \quad (3.2)$$

где A — размерный коэффициент, характеризующий тепловую аккумулирующую способность пароводяной смеси и металла испарительной

части; D_6 — расход насыщенного пара; i' — энтальпия сухого насыщенного пара на выходе из барабана; $i_{пв}$ — энтальпия питательной воды.

Перепишем уравнение (3.2) в другом виде

$$\frac{A}{(i'' - i_{пв})} \frac{dp_6}{dt} = \frac{Q'_T}{(i'' - i_{пв})} - D_6,$$

или

$$C \frac{dp_6}{dt} = D_q - D_6, \quad (3.3)$$

где C — постоянная, характеризующая массовую аккумулирующую способность пароводяной смеси и металла испарительной части котла; D_q — тепловая нагрузка котла, характеризующая тепловосприятие испарительных поверхностей в единицу времени, выраженная в единицах расхода пара $D_q = \frac{Q'_T}{(i'' - i_{пв})}$.

Величины C и D_q могут быть определены экспериментально. Численное значение C определяется по экспериментальной кривой переходного процесса по давлению p_6 при нанесении возмущения расхода пара ΔD_6 , значение $\frac{dp_6}{dt}$ — по тангенсу угла наклона касательной в точке перегиба кривой переходного процесса p_6 (рис. 3.6, б).

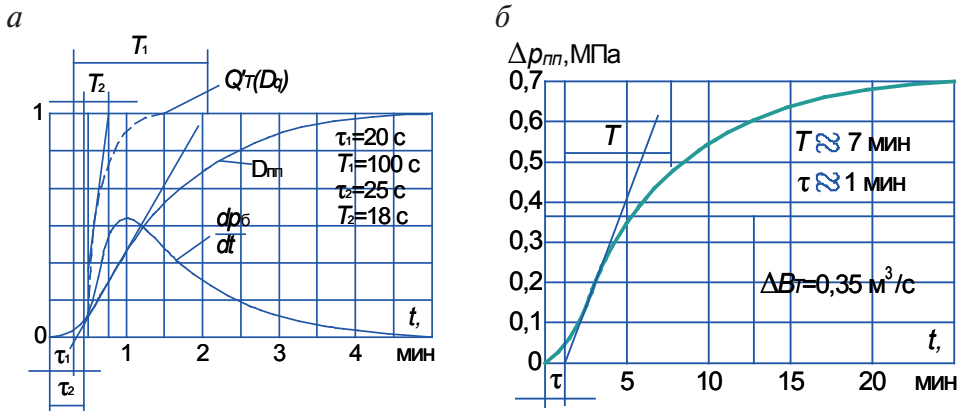


Рис. 3.6. Динамические характеристики по теплу и давлению пара на выходе парогенератора типа ТП-87:

а — по «теплу»; б — по давлению пара на выходе при возмущении топливом ΔB_T

Введение импульса по скорости изменения давления в барабане $\frac{dp_6}{dt}$ (рис. 3.6) существенно уменьшает инерционность объекта по теплу $T_2 < T_1$.

Из выражения (3.3) следует косвенный способ измерения тепловой нагрузки

$$D_q = C \frac{dp_6}{dt} \pm D_6.$$

Учитывая, что $D_{пп} \approx D_6$, для котлов с перегретым паром вместо D_6 можно подставить расход перегретого пара $D_{пп}$. Из рис. 3.6 следует, что для косвенного измерения тепловой нагрузки надо измерить расход пара $D_{пп}$ и скорость изменения давления в барабане котла $\frac{dp_6}{dt}$. В ста-

тическом режиме работы $\frac{dp_6}{dt} = 0$ и тепловая нагрузка совпадает с паровой ($D_q = D_{пп}$).

В итоге структурная схема регулирования тепловой нагрузки для котлов, сжигающих мазут и пылевидное твердое топливо, будет иметь следующий вид (рис. 3.7)

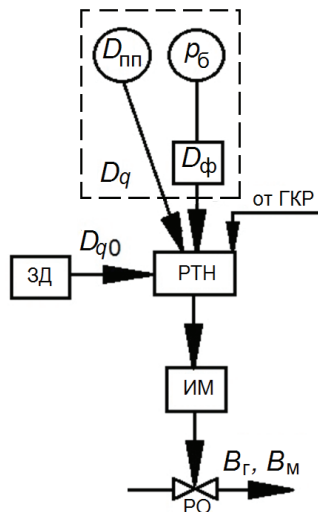


Рис. 3.7. Структурная схема РТН с импульсом по теплу D_q :

$D_{пп}$ — датчик расхода пара; p_6 — давление в барабане котла; ДФ — дифференциатор; B_M — расход мазута; B_T — расход твердого топлива (пыли);

РО — регулирующий орган: клапан при работе на мазуте; питатель пыли при работе на твердом топливе

Схема без импульса от ГКР также стабилизирует тепловую нагрузку, т. е. при внутренних возмущениях качеством топлива РТН будет восстанавливать заданную тепловую нагрузку D_{q0} путем изменения расхода топлива (B_M или B_T). При подключении импульса от ГКР котел перейдет в регулирующий режим работы, изменяя D_{q0} . Эта схема применима для котлов средней и большой мощности и для котлов малой мощности (типа ДЕ), работающих при глубоких изменениях нагрузки, влияющих на давление в барабане котла.

Большинство котлов малой мощности работают, как правило, при слабоизменяющихся нагрузках, которые мало влияют на давление пара в барабане. В этом случае встречаются схемы по измерению расхода пара D_6 или чаще — по давлению в барабане p_6 (рис. 3.8).

Котлы работают в регулирующем режиме, если значением давления в барабане $p_{6,0}$ определяется заданное значение давления пара в магистрали.

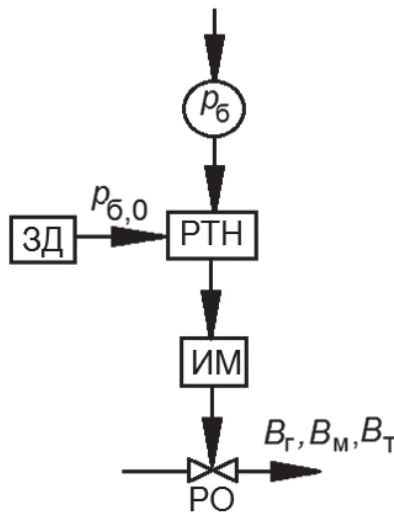


Рис. 3.8. Структурная схема РТН на котлах малой мощности:

$p_{6,0}$ — заданное значение давления в барабане котла

Понятие о главном корректирующем регуляторе

При работе паровых котлов на общую паровую магистраль, из которой пар перераспределяется по потребителям, регулирование тепловой нагрузки (расхода топлива), как правило, осуществляется по каскадной схеме с корректирующим и стабилизирующим регуляторами.

Основным объектом регулирования становится паровая магистраль. Рассмотрим принцип регулирования на основе работы двух котлов, подающих пар в паровую магистраль (рис. 3.9).

На рис. 3.9 представлена достаточно сложная система, включающая производство пара (котлами) и его распределение по потребителям (турбинам) через общую паровую магистраль. Таким образом, объектом регулирования является магистраль, работу которой можно рассматривать в установившемся и динамическом режимах работы.

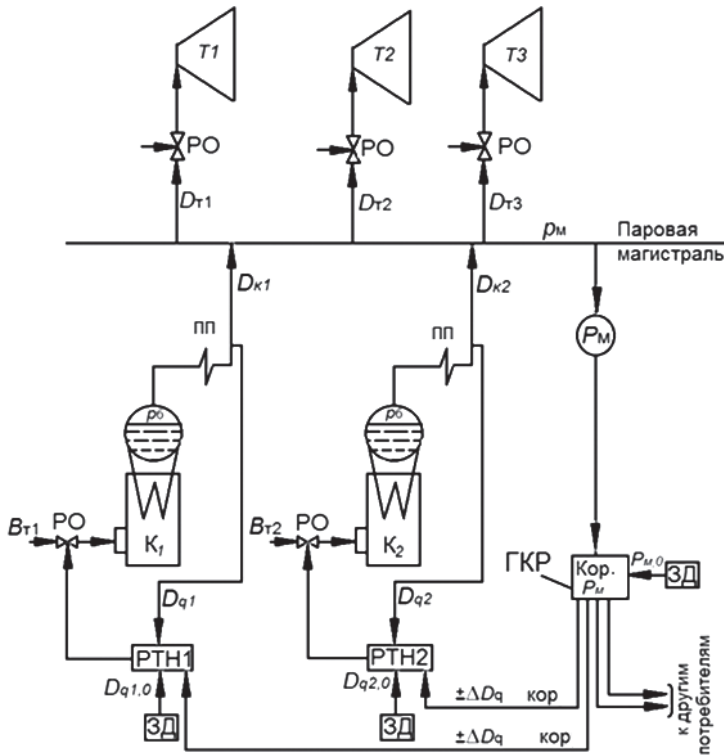


Рис. 3.9. Принципиальная каскадная схема регулирования тепловой нагрузки при работе нескольких котлов на общую паровую магистраль: K_1, K_2 — котлы; T_1, T_2, T_3 — паровые турбины (потребитель); ПП — пароперегреватели; РТН1, РТН2 — регуляторы тепловой нагрузки котлов; B_{T1}, B_{T2} — расход топлива на котлы; D_{K1}, D_{K2} — расходы перегретого пара от котлов; D_{T1}, D_{T2}, D_{T3} — расходы пара на турбины; ЗД — задатчики; D_{q1}, D_{q2} — текущие тепловые нагрузки котлов; D_{q10}, D_{q20} — заданные тепловые нагрузки котлов; ΔD_q — корректирующий импульс по изменению задания РТН котлов; $p_m, p_{m,0}$ — текущее и заданное значения давления пара в магистрали; РО — регулирующие органы; Кор. p_m — корректирующий регулятор давления пара в магистрали

В установившемся режиме (статика) количество подаваемого пара от котлов равно его расходам на турбины

$$D_{к1} + D_{к2} = D_{т1} + D_{т2} + D_{т3}.$$

В этом случае давление пара в магистрали равно заданному давлению $p_{м,0}$. Регулирования давления не требуется.

Внутренние возмущения (со стороны топлива) будут компенсироваться стабилизирующими регуляторами РТН котлов, восстанавливающих заданную тепловую нагрузку путем изменения подачи топлива B_T .

Внешние возмущения (со стороны турбин, изменяющих свою нагрузку) нарушают тепловой баланс рассматриваемой системы, и давление пара в магистрали p_m будет изменяться. Его необходимо регулировать. С этой целью устанавливается регулятор давления пара в магистрали Rp_m , который измеряет текущее давление p_m датчиков и поддерживает его заданным $p_{м,0}$, вырабатывая корректирующие импульсы $\pm \Delta D_q$, подаваемые на стабилизирующие регуляторы РТН, изменяя им задание ($D_{q,0} \pm \Delta D_q$). В соответствии с новым заданием регуляторы РТН1 и РТН2 будут увеличивать (или уменьшать) расходы топлива на котлы, т. е. изменять паропроизводительность котлов ($D_{к1} + D_{к2}$) таким образом, чтобы восстановить новый баланс расходов пара в системе при давлении пара в магистрали $p_{м,0}$.

Регулятор давления пара в магистрали Rp_m является корректирующим (выдает корректирующие импульсы регуляторам РТН); его называют главным корректирующим регулятором (ГКР), поскольку он управляет работой нескольких котлов. При отключении корректирующих импульсов котлы работают в базовом режиме и их регуляторы тепловых нагрузок (ТРН) устраняют только внутренние топочные возмущения, приводящие к изменению тепловыделений в топке.

3.3. Регулирование экономичности процесса горения топлива (регулирование подачи общего воздуха)

Автоматическая система регулирования общего воздуха предназначена для поддержания наиболее экономичного режима сжигания топлива в топке котла. Для полного сжигания единицы расхода топлива

необходим определенный расход воздуха, количество которого зависит от вида и сорта сжигаемого топлива и его характеристик. В топку подается немного больше воздуха, чем требуется для полного сгорания топлива. Расход воздуха в топку определяется коэффициентом избытка воздуха, оптимальное значение которого зависит от вида сжигаемого топлива: $\alpha_{\text{опт}} \approx 1,03 \dots 1,05$ при сжигании газа; $\alpha_{\text{опт}} \approx 1,05 \dots 1,1$ при сжигании мазута и $\alpha_{\text{опт}} \approx 1,15 \dots 1,25$ при сжигании углей. Оптимальные значения $\alpha_{\text{опт}}$ либо устанавливаются заводом-изготовителем котельного оборудования, либо определяются при режимных испытаниях котла.

От значений α зависят потери теплоты в котле: q_2 (с уходящими газами); q_3 и q_4 (от химического и механического недожога топлива), которые влияют на КПД котла $\eta_{\text{ка}}$. Система регулирования подачи воздуха должна на каждой нагрузке котла поддерживать оптимальное значение $\eta_{\text{ка}}$. Качественное влияние коэффициента избытка воздуха α на составляющие потерь и $\eta_{\text{ка}}$ представлено на рис. 3.10.

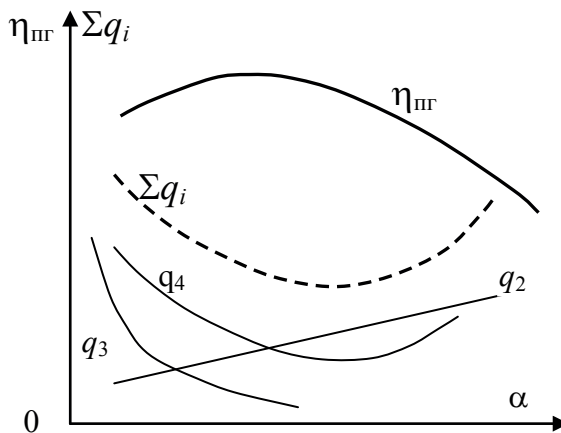


Рис. 3.10. Зависимость $\eta_{\text{ка}}$ и суммарных потерь Σq_i от коэффициента избытка воздуха

Значение оптимального коэффициента избытка воздуха можно оценить по содержанию свободного кислорода O_2 в дымовых газах, покидающих топку, на основании кислородной формулы для полного сгорания топлива

$$\alpha = \frac{21 \%}{21 \% - O_2}.$$

с учетом участка регулирования экономичности процесса горения, в который входят топочная камера и примыкающий к ней газоход конвективного пароперегревателя до места изменения концентрации O_2 , который производится за пароперегревателем.

Оптимальное значение O_2 при номинальной нагрузке примерно составит при сжигании газа и мазута 0,2–2 % O_2 , а при сжигании твердых топлив 3–5 % O_2 .

В настоящее время разработаны и используются электрохимические датчики (ЭХД) для измерения содержания свободного кислорода O_2 в уходящих дымовых газах, которые могут использоваться для точного регулирования подачи воздуха на горение топлива, в установившихся режимах работы котлов.

Динамические характеристики (кривые разгона) участка по содержанию кислорода O_2 в дымовых газах за пароперегревателем при нанесении возмущения увеличением расхода воздуха (ΔQ_v) и топлива (ΔB_f) приведены на рис. 3.11. Инерционность участка объясняется влиянием объема топочной камеры и газохода, включающего пароперегреватель, а также запаздыванием в измерительном устройстве (датчики кислорода O_2).

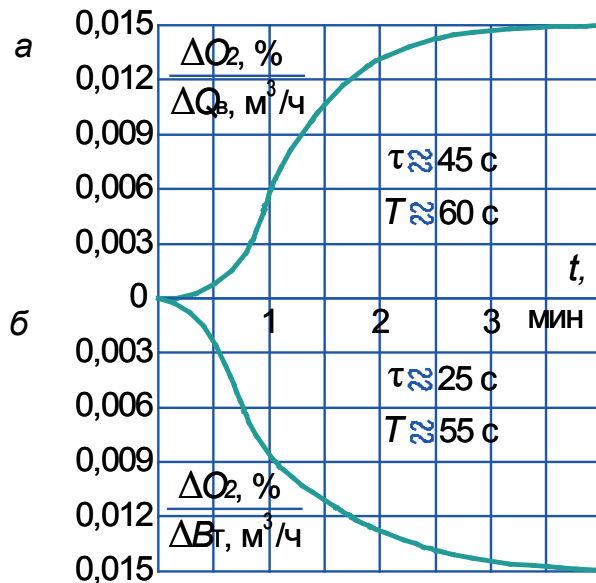


Рис. 3.11. Временные характеристики по содержанию кислорода в дымовых газах:

а — при возмущении расходом воздуха; *б* — при возмущении расходом топлива (газа)

Из рис. 3.11 видно, что увеличение расхода топлива и воздуха имеет противоположное влияние на содержание свободного кислорода в дымовых газах. Временные характеристики примерно одинаковы, но противоположны по знаку, следовательно, при срабатывании регулятора тепловой нагрузки, изменяющего расход топлива, должен сработать регулятор воздуха настолько, насколько необходимо для сжигания топлива.

Количество подаваемого воздуха зависит от вида и состава топлива, но, как показали расчеты и экспериментальные исследования, на выработку единицы теплоты, выделившейся в топке при сжигании любого вида топлива, требуется примерно одно и то же количество воздуха. Максимальное отличие в количестве воздуха составляет примерно 4%. Поэтому основной схемой регулирования подачи воздуха является выдерживание соотношения «тепловая нагрузка — воздух», которое может видоизменяться в зависимости от способа измерения тепловой нагрузки котла.

1) Для топлив с постоянными характеристиками (газ, мазут), расход которых можно достаточно точно измерить и тепловая нагрузка которых определяется по расходу топлива, используется схема соотношения «топливо — воздух» (рис. 3.12).

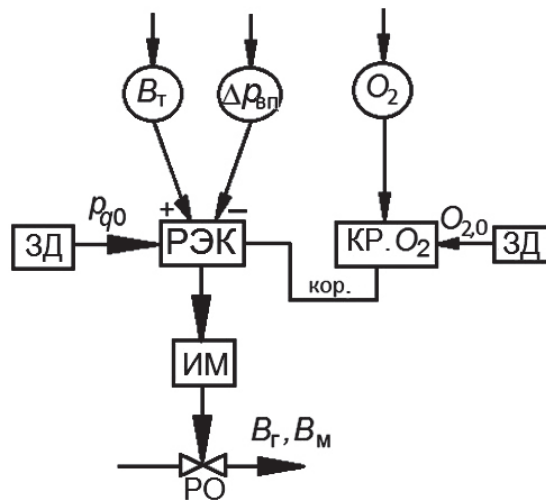


Рис. 3.12. Регулирование подачи воздуха (экономичности) по соотношению «топливо — воздух»:

B_T — расход топлива; $\Delta p_{вп}$ — перепад давления на воздухоподогревателе;
 O_2 — содержание свободного кислорода в дымовых газах); РЭК — регулятор экономичности; КР. O_2 — корректирующий регулятор по кислороду;
 ЗД — задатчик; ИМ — исполнительный механизм; РО — регулирующий орган (направляющий аппарат вентилятора)

При постоянном качестве топлива его расход B_T и количество воздуха, необходимого для обеспечения полноты сгорания, связаны пропорциональной зависимостью, устанавливаемой в результате режимных испытаний котла.

Сигналы от датчиков расходов топлива (B_T) и воздуха ($\Delta p_{вп}$) включены встречно («+» и «-»).

Если расход воздуха Q_v соответствует расходу топлива, то разность сигналов от датчиков топлива и воздуха равна нулю, регулятор отключен, соотношение расходов топлива выдержано. При срабатывании регулятора тепловой нагрузки котла (РТН) расход топлива B_T изменится, на входе в регулятор экономичности (РЭК) появится сигнал рассогласования, РЭК сработает и будет изменять расход воздуха Q_v до тех пор, пока не установится новое соотношение расходов топлива и воздуха, при котором РЭК отключится. Регулятор при такой работе называют стабилизирующим.

Расход воздуха может осуществляться различными методами. Если на котле имеются трубчатые воздухоподогреватели, то расход воздуха обычно определяют по перепаду давления $\Delta p_{вп}$ на воздухоподогревателе (на первой ступени или на всем воздухоподогревателе). На котлах малой мощности, ввиду отсутствия воздухоподогревателей, расход воздуха определяют по давлению на нагнетании дутьевых вентиляторов. Существуют и другие методы.

Соотношение «топливо — воздух» выдерживается с такой точностью, которая зависит от нагрузки на котел. Для более точного регулирования экономичности на регулятор подают дополнительный корректирующий импульс по содержанию свободного кислорода O_2 в дымовых газах.

Импульс от датчика кислорода O_2 поступает на корректирующий регулятор КР. O_2 , который поддерживает оптимальное заданное содержание кислорода $O_{2,0}$ (оптимальные значения коэффициента избытка воздуха $\alpha_{опт}$). Отбор дымовых газов на анализ содержания O_2 производится на выходе из котла.

Эта схема применяется для регулирования экономичности и на котлах малой мощности, работающих на газе при переменных нагрузках (рис. 3.13).

2) При работе на мазуте переменного состава и пылевидном сжигании твердого топлива используется схема «тепловая нагрузка — воздух». Тепловая нагрузка измеряется по расходу пара и скорости изме-

нения давления в барабане котла. Структурная схема регулирования представлена на рис. 3.14.

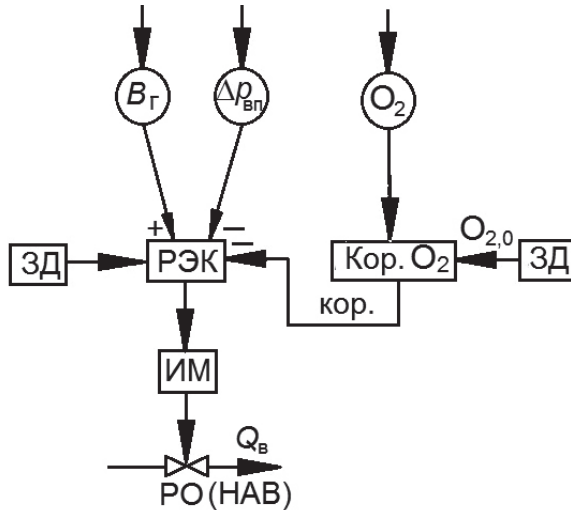


Рис. 3.13. Регулирование экономичности на котлах малой мощности:

V_g — расход газа (остальные обозначения те же, что и на рис. 3.12)

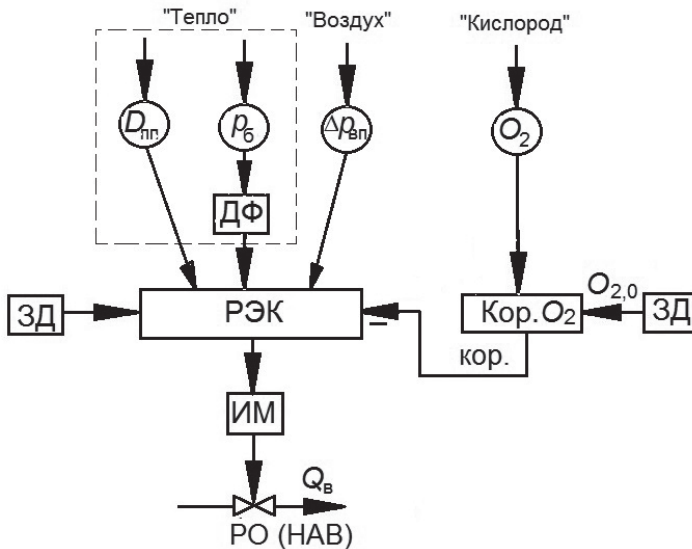


Рис. 3.14. Регулирование экономичности по соотношению «теплота — воздух»:

$D_{пл}$ — расход перегретого пара; p_b — давление в барабане; ДФ — дифференциатор (остальные обозначения см. в предыдущих схемах)

При изменении тепловой нагрузки на котел, регулятор быстро, но грубо стабилизирует соотношение «теплота — воздух», изменяя расход воздуха $Q_{\text{в}}$, а корректирующий регулятор по кислороду O_2 позволяет точно регулировать экономичность.

3) Регулирование экономичности по соотношению «задание — воздух» с дополнительным сигналом по содержанию кислорода O_2 .

К недостаткам схемы «теплота — воздух» относится то, что при частых и существенных внутренних возмущениях она изменяет расход воздуха лишь после изменения тепловосприятия в котле (после срабатывания РТН), т. е. запаздывает во времени и не обеспечивает правильного соотношения «топливо — воздух» в динамическом режиме. Для устранения этого недостатка применяют схему «нагрузка — воздух», в которой регулятор воздуха получает сигнал по давлению пара в общей паровой магистрали одновременно с регулятором тепловой нагрузки (регуляторы РТН и РЭК работают параллельно) (рис. 3.15). Этим достигается быстрое действие автоматической системы регулирования общего воздуха при отработке внешних возмущений.

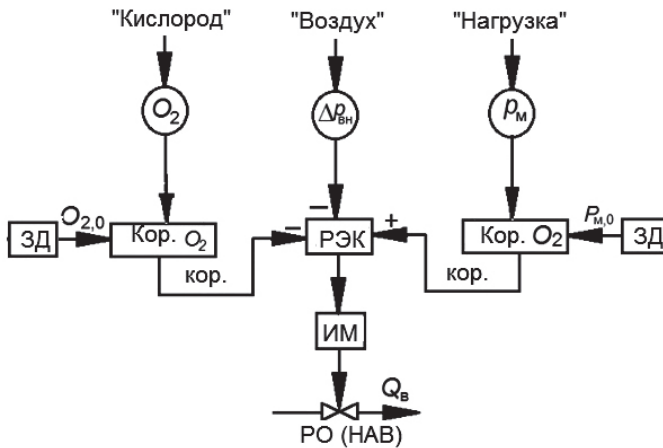


Рис. 3.15. Регулирование экономичности по схеме «нагрузка — воздух»

Такая схема чаще всего применяется на котлах, работающих в регулирующем режиме, когда преобладают внешние возмущения.

4) Регулирование экономичности по соотношению «пар — воздух».

При работе котла в базовом режиме работы о тепловыделении в топке можно судить по расходу пара (формула (3.1)).

Системы регулирования, в которых тепловая нагрузка оценивается по расходу пара $D_{\text{пн}}$, получили название «пар — воздух» (рис. 3.16). Недостатком таких схем является то, что расход пара характеризует

тепловыделение в топке достаточно точно лишь при постоянных нагрузках. В переходных процессах (регулирующий режим) часть теплоты аккумулируется в металле и пароводяной смеси котла, и регулирование экономичности будет неточным.

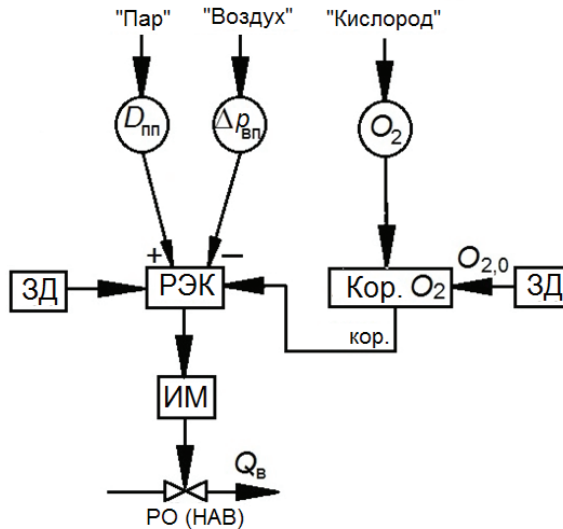


Рис. 3.16. Регулирование экономичности по соотношению «пар — воздух»

Благодаря своей простоте и высокой надежности эта схема применяется для котлов, работающих с редко и плавно изменяющейся нагрузкой, в том числе и для котлов малой мощности.

Для изменения расхода воздуха в качестве регулирующего органа (РО) применяют направляющие аппараты вентиляторов (НАВ) осевого или упрощенного типа. В последнее время для регулирования производительности вентиляторов стали использовать более экономичное частотное управление оборотами электродвигателя.

3.4. Автоматическая система регулирования разрежения в топке котла

Для построения схемы регулирования разрежения рассмотрим топку котла с входящими и выходящими потоками (рис. 3.17).

В топку котла входят потоки топлива B_T и воздуха Q_B , а выходной поток дымовых газов — $Q_.$. В установившемся режиме работы в топ-

ке существует баланс расходов $B_T + Q_B = Q_{дг}$. Показателем этого является постоянное давление в топке S_T . В динамических режимах работы котла срабатывают регуляторы нагрузки (РТН) и экономичности (РЭК) и нарушают баланс, изменяя расходы топлива и воздуха; давление в топке S_T изменяется, и его надо регулировать. Регулятор должен управлять отводом дымовых газов Q_T .

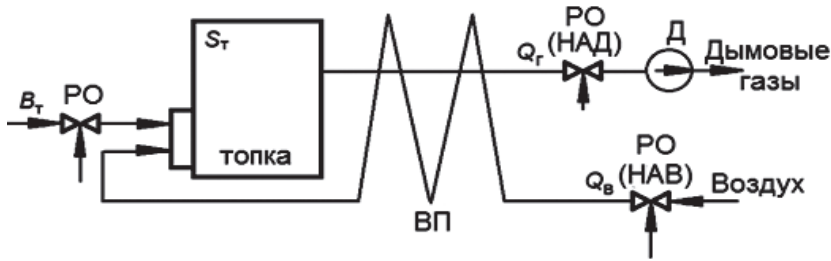


Рис. 3.17. Схема топki котла с потоками

По условиям осуществления нормального топочного режима в верхней части топki необходимо поддерживать небольшое разрежение ($S_T = 20 \dots 30$ Па), которое препятствует выбиванию газов из топki. Увеличение разрежения приводит к увеличению присосов холодного воздуха через неплотности в обмуровке, к уменьшению КПД котла и перерасходу электроэнергии на привод дымососа. Резкое увеличение разрежения (до 150–250 Па) может привести к срыву и погасанию факела с последующим остановом котла защитой по погасанию факела.

Повышение давления в топке выше барометрического ведет к выбиванию дымовых газов из-за неплотности в обмуровке, загазованности воздуха в помещении, что запрещено правилами техники безопасности.

Свойства топki как объекта регулирования разрежения в верхней части при возмущении расходом топочных газов определяется по кривой разгона (рис. 3.18).

Из рис. 3.18 следует, что топка практически не имеет запаздывания, обладает малой инерционностью и представляет собой одноемкостный статический объект.

Автоматическая система регулирования разрежения тесно связана с автоматической системой подачи общего воздуха (РЭК) и является составной частью процесса горения. Она строится по типовой схеме (рис. 3.19).

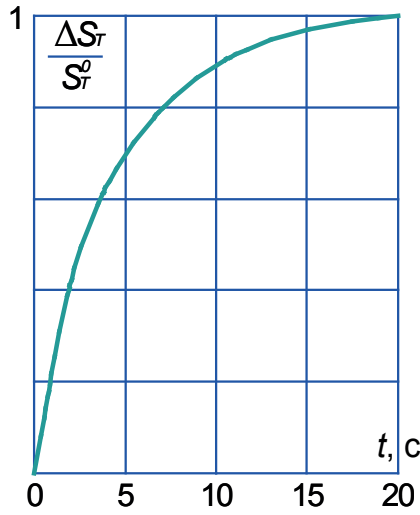


Рис. 3.18. Переходный процесс по разрежению в топке при возмущении расходом дымовых газов ΔQ_T :

S_T^0 — начальное разрежение; ΔS_T — изменения разрежения; t — время, с

Разрежение S_T в верхней части топки измеряется датчиком и подается на регулятор разрежения (P_{S_T}), который через исполнительный механизм (ИМ) управляет направляющим аппаратом дымососа (НАД), изменяющим расход газа Q_T . Производительность дымососа может изменяться и с помощью частотного регулирования числа оборотов двигателя.

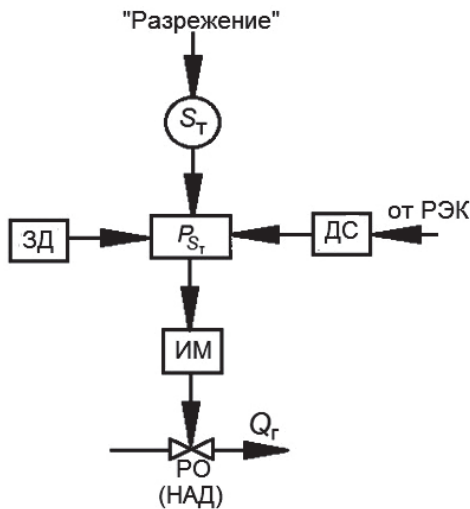


Рис. 3.19. Схема регулирования разрежения (ДС — динамическая связь)

Для улучшения работы системы в динамических режимах на регулятор разрежения (PS_r) может поступать сигнал от регулятора воздуха (РЭК) через динамическую связь (ДС), который включается при срабатывании РЭК и снимается при его отключении.

3.5. Регулирование уровня воды в барабане котла (регулирование питания котла водой)

Котел как объект регулирования уровня воды в барабане можно рассмотреть по упрощенной технологической схеме с указанием входящих и выходящих потоков (рис. 3.20).

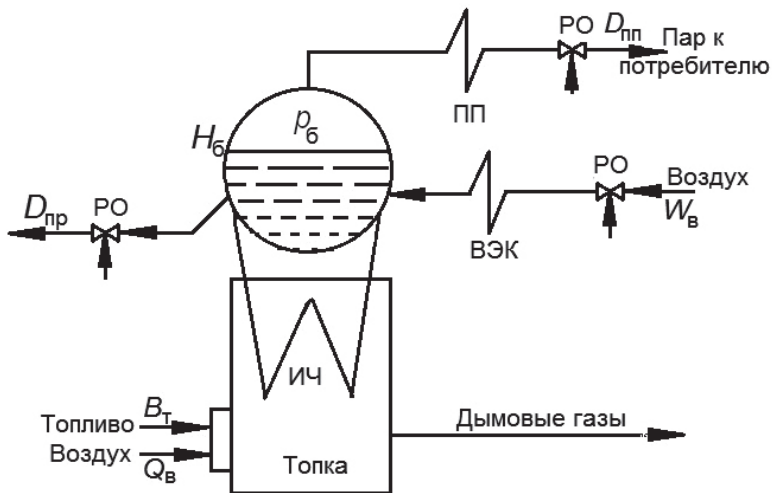


Рис. 3.20. Технологическая схема котла как объекта регулирования уровня

В установившемся режиме работы котла должен соблюдаться баланс входящих и выходящих расходов сред ($W_B = D_{пп} - D_{пр}$). Поскольку расход продувочной воды $D_{пр}$ составляет малую долю от расхода перегретого пара $D_{пп}$, можно рассматривать приближенный баланс $W_B \approx D_{пп}$, при котором среднее значение уровня воды в барабане H_6 должно быть постоянными. При внутренних (со стороны топлива и топки) и внешних возмущениях (со стороны подачи воды и потребителя пара) этот баланс нарушается, что приводит к изменению уровня H_6 , который надо регулировать.

Требования к качеству регулирования уровня достаточно жесткие: пределы его изменений в переходных режимах строго ограничены условиями безаварийной работы котла. Снижение уровня ниже допустимых пределов (так называемый «упуск воды») может привести к нарушению циркуляции в экранных трубах (застой воды, опрокидывание циркуляции) и, как следствие, к нарушению охлаждения водой подъемных труб, нарушению их прочности в местах стыковки с корпусом барабана и даже к пережогу. Чрезмерное повышение уровня (так называемая «перепитка» котла) может привести к ухудшению работы внутрибарабанных сепарационных устройств, захвату частиц воды паром, преждевременному заносу солями пароперегревателя, забросу частиц воды в турбину, что может явиться причиной механических повреждений ее ротора и лопаток.

Принято, что максимально допустимые отклонения по уровню составляют ($\pm 50 \dots 70$) мм от среднего значения, установленного заводом-изготовителем. Снижение уровня ниже видимой части водомерного стекла, устанавливаемого на барабане котла, считается упуском воды, а превышение его верхней видимой части — перепиткой. Упуск и перепитка приводят к аварии, поэтому в том или другом случае должна сработать защита на останов котла. Расстояние между этими критическими отметками составляет примерно 400 мм.

Отклонение уровня воды в барабане от среднего значения происходит не только от возникновения небаланса между притоком воды и расходом пара ($W_B - D_{пп}$), но и из-за изменения давления пара в барабане p_6 , которое приводит к изменению содержания пара в пароводяной смеси контура циркуляции (подъемных трубах).

Изменение уровня воды только под действием небаланса между расходами воды и пара описываются уравнением динамики

$$F(\rho' - \rho'') \frac{dH_6}{dt} = W_B - D_{пп}, \quad (3.4)$$

где F — площадь зеркала испарения, м; ρ' и ρ'' — плотности воды и насыщенного пара, кг/м³; H_6 — уровень воды в барабане котла, м; W_B и $D_{пп}$ — расходы питательной воды и перегретого пара, кг/с.

Перейдя к безразмерным величинам $\left(\frac{H_6}{H_0} = x_{\text{вх}} \right)$, $\left(\frac{W_B - D_{пп}}{W_{B,0}} = x_{\text{вх}} \right)$,

запишем уравнение (3.4) в виде

$$T \frac{dx_{\text{вых}}}{dt} = x_{\text{вх}}, \quad (3.5)$$

где T — постоянная времени объекта, с, $T = \frac{F(\rho' - \rho'')H_0}{W_{в,0}}$.

Из выражения (3.5) следует, что по динамическим свойствам барабан котла как объект регулирования уровня является интегрирующим звеном (по каналу небаланс расхода воды и пара — уровень воды в барабане).

При постоянном или слабо изменяющемся давлении пара в барабане p_6 , характерном для котлов малой мощности при небольших изменениях или при возмущениях расхода пара расходом питательной воды, уровень будет зависеть только от небаланса. На рис. 3.21 представлена разгонная характеристика котла по уровню воды при возмущении расходом пара.

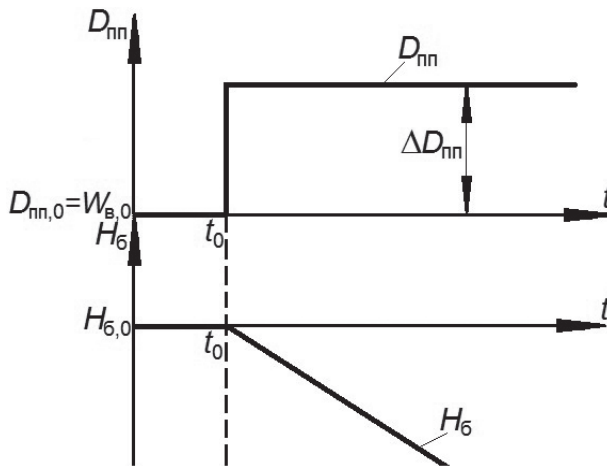


Рис. 3.21. Разгонная характеристика котла по уровню воды в барабане при возмущении расходом пара (t_0 — момент времени нанесения возмущения)

Такая же характеристика получается при возмущении уменьшением расхода питательной воды.

На котлах малой мощности, работающих в таких режимах, достаточно установить одноимпульсный регулятор уровня (питания котла водой). Регулятор должен измерять уровень воды в барабане H_6

и управлять подачей воды на котел (W_B). Структурная схема регулятора представлена на рис. 3.22.

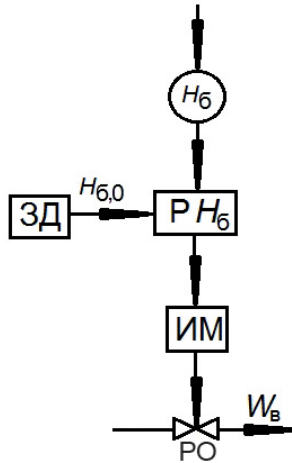


Рис. 3.22. Схема регулирования уровня питательной воды

При резких и существенных изменениях расхода перегретого пара давление в барабане котла p_6 будет существенно изменяться, что скажется на поведении уровня воды. При увеличении расхода пара резко уменьшается давление пара в барабане, что приводит к уменьшению температуры кипения воды. Вода в контуре циркуляции оказывается перегретой, и избыток теплоты, содержащейся в воде, расходуется на ее объемное испарение, что приводит к образованию дополнительных пузырьков пара в контуре циркуляции под зеркалом испарения. Объем пароводяной смеси в контуре возрастает, и видимый уровень воды увеличивается до тех пор, пока давление в барабане не установится. Это явление называют набуханием уровня.

Таким образом, на поведение уровня воды влияют две причины: падение давления в барабане и небаланс между притоком воды и расходом пара ($W_B - D_{\text{пп}}$).

Барабан котла как объект регулирования уровня при возмущении изменением давления p_6 будет представлять собой инерционное звено первого порядка (H_{61}), а при возмущении небалансом — интегрирующее звено (H_{62}). Действительное изменение уровня H_6 получается в результате суммирования этих влияний (рис. 3.23).

В течение времени набухания T_H уровень от влияния давления будет возрастать (область возрастания уровня заштрихована), а не умень-

шаться, поэтому на котлах, работающих в этих режимах, устанавливать одноимпульсный регулятор нельзя, так как он будет увеличивать разбаланс между притоком воды и расходом пара, что приведет к упуску уровня и срабатыванию защиты.

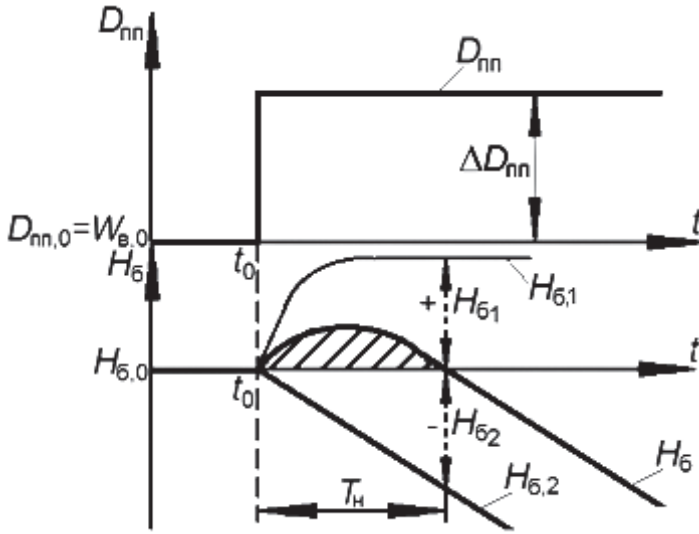


Рис. 3.23. Разгонная характеристика котла по уровню воды в барабане при возмущении расходом пара:

$H_{б1}$ — влияние давления в барабане; $H_{б2}$ — влияние небаланса;
 $H_б$ — действительное изменение уровня; $T_н$ — время набухания

При уменьшении расхода пара $D_{пн}$, давление в барабане $p_б$ будет возрастать, температура кипения воды в контуре циркуляции возрастет, вода окажется недогретой и часть пара, находящегося в пароводяной смеси, сконденсируется, отдавая тепло конденсации на нагрев воды. Имеем обратный процесс набухания, уровень воды в течение времени набухания $T_н$ будет уменьшаться.

На паровых котлах, работающих при переменных нагрузках, используют трехимпульсный регулятор уровня, т. е. переходят к комбинированному принципу регулирования. Кроме основного импульса по уровню воды в барабане $H_б$, в регулятор вводят дополнительные импульсы по возмущениям — расходу перегретого пара и расходу питательной воды (рис. 3.24).

Импульсы от датчиков по расходу воды $W_в$ и расходу пара $D_{пн}$ подаются встречно (знаки «+» и «-»). В статическом режиме, когда суще-

ствуется баланс расходов воды и пара, эти импульсы уничтожаются и регулятор становится одноимпульсным (по уровню H_6). При увеличении (уменьшении) расхода пара $D_{пп}$ на вход в регулятор PH_6 подается сигнал по небалансу и регулятор увеличивает (уменьшает) расход воды W_B до тех пор, пока не установится новый баланс. Таким образом будет осуществлено грубое, но быстрое установление нового баланса. За это время уровень H_6 изменится и будет в дальнейшем точно отрегулирован.

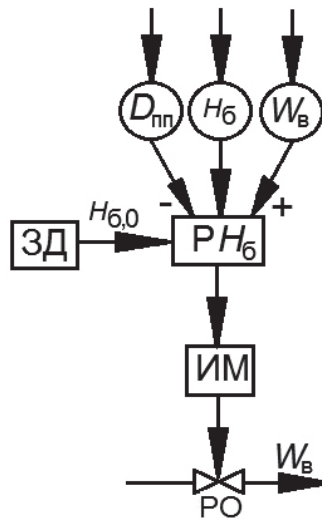


Рис. 3.24. Структурная схема трехимпульсного регулятора уровня

Как правило, питание водой котлов осуществляется по двум ниткам (т. е. на котле устанавливают два узла питания). В таком случае устанавливают два регулятора питания. При выходе из строя одного регулятора переходят на питание по второй нитке.

3.6. Регулирование водного режима в барабанных паровых котлах (регулирование солесодержания котловой воды)

В процессе работы парового котла происходит непрерывное накопление солей в котловой воде. Соли поступают с питательной водой (в основном это соли NaCl и SiO_2), которые скапливаются в котловой

воде в процессе парообразования. Упрощенная технологическая схема участка образования солей в котловой воде представлена на рис. 3.25.

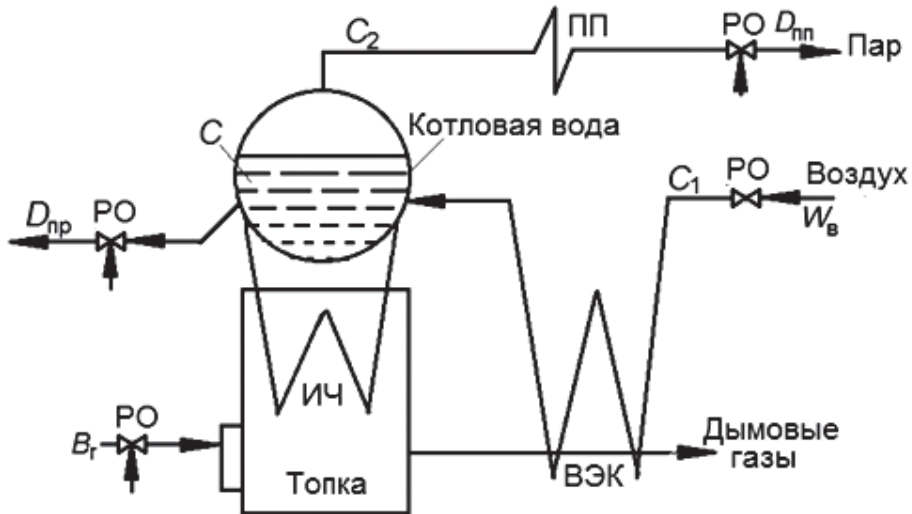


Рис. 3.25. Технологическая схема участка образования солей в котловой воде

С питательной водой в котел поступают соли концентрацией C_1 (50 мг/кг), а с расходом пара $D_{\text{пр}}$ удаляются соли значительно меньшей концентрации C_2 (примерно на порядок 5 мг/кг). Остальное количество солей (C_1 и C_2) с течением времени будет накапливаться в котловой воде. Химический состав воды, циркулирующей в барабанных котлах, оказывает существенное влияние на длительность их безостановочной и безремонтной работы. Повышение общего солесодержания котловой воды сверх допустимого значения C может привести к уносу солей котловой воды в пароперегреватель и турбину (особенно при вспенивании солей), что приведет к аварийным ситуациям в их работе.

Поддержание общего солесодержания котловой воды в процессах нормы осуществляется с помощью непрерывной и периодической продувок из соленых отсеков барабана (или выносных циклонов) в специальные расширители. Потери котловой воды с продувкой восполняются регулятором уровня воды в барабане котла.

Периодическая продувка производится 1–2 раза в смену, служит для удаления шлама из нижних коллекторов и не автоматизируется.

Непрерывная продувка служит для удаления избытка солей NaCl и SiO_2 , скапливающихся в котловой воде в процессе парообразования. Значение непрерывной продувки колеблется в пределах 0,5–2% от максимальной производительности котла. Поскольку потери тепла с продувкой лишь частично возвращаются в тепловую схему станции (или котельной) с конденсатом пара из расширителей непрерывной продувки, поддержание солесодержания котловой воды с большим запасом по сравнению с допустимым за счет увеличения расхода продувочной воды неэкономично.

По своим свойствам этот участок регулирования представляет собой многоемкостный статический объект с небольшим временем запаздывания (1–3 мин), но достаточно большой постоянной времени (10–40 мин) в зависимости от типа и мощности котла.

На котлах малой и средней мощности, работающих при небольших изменениях паровых нагрузок регулирования, солесодержание котловой воды производится по одноимпульсной схеме, в которой основным импульсом является солесодержание котловой воды. Поскольку регулятор управляет расходом воды непрерывной продувки, его называют регулятором непрерывной продувки (РНП). Схема регулятора РНП представлена на рис. 3.26.

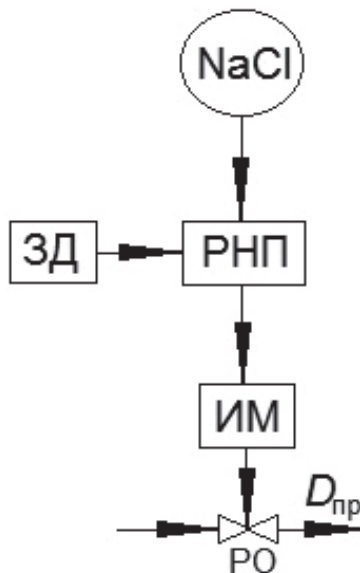


Рис. 3.26. Одноимпульсная структурная схема регулятора непрерывной продувки

На паровых котлах малой мощности, работающих при постоянных или малых колебаниях нагрузки, обычно используют ручное регулирование соленосодержания котловой воды по анализу ее в химлаборатории.

На котлах средней и большой мощности, работающих при переменных паровых нагрузках, используется 3-х импульсный регулятор. Дополнительными импульсами, помимо соленосодержания котловой воды, являются расход перегретого пара $D_{пп}$ и расход продувочной воды $D_{пр}$ (комбинированный принцип регулирования) (рис. 3.27), которые включены встречно.

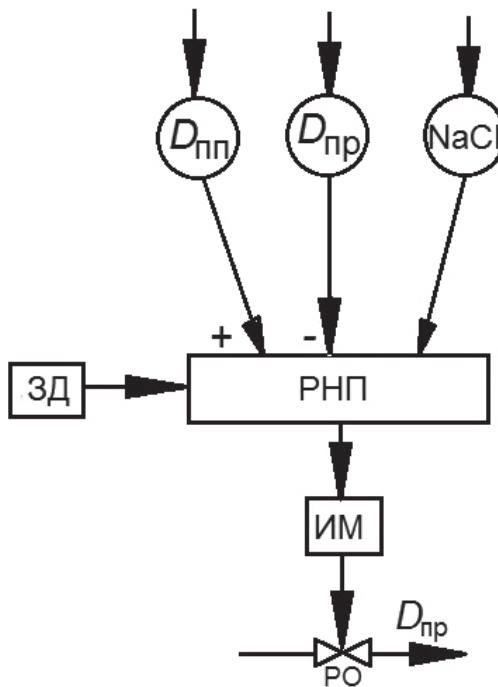


Рис. 3.27. Структурная схема 3-х импульсного регулятора непрерывной продувки

Когда расход продувочной воды $D_{пр}$ соответствует расходу перегретого пара $D_{пп}$, сигналы от датчиков одинаковы, взаимно уничтожаются в измерительной схеме регулятора РНП, регулятор становится одноимпульсным (по соленосодержанию котловой воды).

При изменении нагрузки на котел сигнал от датчика $D_{пп}$ изменяется, сигнал рассогласования от датчиков по $D_{пп}$ и $D_{пр}$ поступает на вход РНП, и он изменяет расход продувочной воды $D_{пр}$ до тех пор, пока

опять расход продувочной воды не будет соответствовать новому расходу пара $D_{\text{мп}}$. Таким образом, регулятор восстановит новый баланс расходов, т. е. произведет быстрое, но грубое регулирование необходимого расхода продувочной воды. Точное регулирование будет произведено по импульсу от датчика соледержания котловой воды (NaCl).

3.7. Регулирование температуры перегретого пара

Некоторые паровые котлы низкого давления и малой производительности имеют пароперегреватель со слабым перегревом пара (225–250 °С), температура пара в которых не регулируется. Регулирование температуры перегретого пара требуется на барабанных паровых котлах среднего и высокого давления и различной мощности, которые подают пар на турбины. В таком случае автоматическая система регулирования температуры перегретого пара предназначена для поддержания заданного температурного режима в паровом тракте котла при изменениях паровых нагрузок в широких пределах. На современных энергетических котлах точность поддержания заданного значения температуры перегретого пара на выходе при номинальной нагрузке котла должна выдерживаться с минимальными отклонениями от заданного значения (например, $t_{\text{мп}} = 535...550$ °С). Для котлов средней мощности эти требования немного ниже ($t_{\text{мп}} = 425...450$ °С).

Точность поддержания заданного значения температуры перегретого пара существенно влияет на экономичность и надежность работы котла и турбины. Снижение температуры пара на 10 °С эквивалентно перерасходу топлива на 0,2 % и повышает влажность пара на выходе из последних ступеней турбины (например, в цикле станции с давлением перегретого пара 10 МПа и $t_{\text{мп}} = 540$ °С влажность пара на выходе из турбины повышается на 0,7 %).

Температура перегрева пара для барабанных котлов зависит как от паровой нагрузки котла ($D_{\text{мп}}$), так и от тепловосприятости пароперегревателя, передаваемого от дымовых газов излучением и конвекцией. Изменения паровой нагрузки являются внешним возмущением, которое приводит к перераспределению тепловосприятости между конвективной и радиационной частями пароперегревателя и изменению температуры пара на выходе из котла.

Влияние паровой нагрузки котла на температуру пара зависит от конструкции пароперегревателя, соотношения его радиационной и конвективной частей и взаимного расположения пакетов пароперегревателя по ходу дымовых газов. Для чисто конвективного пароперегревателя с увеличением нагрузки возрастают объем, скорость и температура дымовых газов, а значит, и доля теплоты, переданная конвективным поверхностям нагрева, что приводит к увеличению температуры пара. У радиационных пароперегревателей с увеличением нагрузки температура дымовых газов растет незначительно, что приводит к снижению удельного тепловосприятия радиационных поверхностей и, следовательно, к уменьшению температуры перегретого пара. У полурadiационных пароперегревателей изменение паровой нагрузки несущественно влияет на температуру пара. У барабанных паровых котлов преобладает конвективная часть пароперегревателя.

При постоянной паровой нагрузке тепловосприятие пароперегревателей определяется топочным режимом и может определяться загрязнением поверхностей нагрева, изменением состава топлива, тониной помола твердого топлива и т. п. (это внутренние возмущения в котле).

Шлакование топки (испарительных поверхностей нагрева) приводит к увеличению температуры газов на выходе из топки и уменьшению парообразования, что ведет к повышению температуры пара. Загрязнения поверхностей нагрева пароперегревателя (при заносе золой наружных поверхностей или заносе солями внутренних поверхностей) уменьшает тепловосприятие пароперегревателя и температуру пара. Изменение тонины помола топлива приводит к изменению длины факела, поскольку при грубом помоле частицы топлива догорают в верхней части топки. В связи с этим уменьшается паропроизводительность экранных поверхностей (испарительной части котла), увеличивается доля конвективного теплообмена и температура пара растет.

Из вышесказанного следует, что для регулирования температуры перегретого пара возможно использование двух способов: газового и парового.

Газовый способ регулирования перегрева пара может быть осуществлен за счет изменения расхода температуры дымовых газов, омывающих пароперегреватель. Это, как правило, осуществляется изменением положения факела в топке, рециркуляцией дымовых газов и перераспределением количества дымовых газов по параллельно расположенным газходам.

Положение факела в топке можно изменять либо изменением положения поворотных горелок ($(\pm 15)^\circ\text{C}$ от оси), либо переключением

горелки при многоярусном их расположении. Только небольшое количество котлов оснащено такими горелками, поэтому данный способ используется как ручной в необходимых случаях, в помощь паровому способу регулирования.

Метод рециркуляции дымовых газов применяется в большом количестве работающих котлов. Он состоит в том, что часть дымовых газов из конвективной шахты (после экономайзера) специальным рециркуляционным дымососом возвращается в топку (в нижнюю или верхнюю ее части). Этот способ также используется как ручное регулирование в помощь паровому способу.

Перераспределение расхода дымовых газов через пароперегреватель и помимо него подразумевает пропуск части газа по отводному газоходу, в котором расположена регулирующая заслонка. Только небольшая часть работающих котлов имеет обводной газоход, заслонка в котором работает в очень тяжелых температурных условиях (900–1000 °С).

Газовые способы регулирования снижают экономичность сжигания топлива, так как при них или нарушается настроенный топочный режим (управление горелками), или снижается экономичность работы котла из-за увеличения расхода электроэнергии на приводы дымососов и потерь с уходящими газами (рециркуляция дымовых газов).

Паровой способ регулирования температуры перегретого пара заключается в установке пароохладителей, встраиваемых в паровой тракт котлов среднего и высокого давления.

Пароперегреватель по своим свойствам представляет собой объект с распределенной по длине тепловой емкостью, обладающей достаточно большим временем запаздывания и постоянной времени (инерционностью). В практике наладки автоматических систем регулирования достаточно часто применяют приближенный метод представления динамических свойств пароперегревателя, заменяя его моделью инерционного звена первого порядка с полным временем запаздывания (транспортным и переходным).

Наиболее целесообразным способом установки пароохладителя является его размещение в рассечку пароперегревателя возможно ближе к выходу пара. Это существенно улучшает динамические свойства пароперегревателя (уменьшает инерционность и время запаздывания) и дает возможность ограничить максимальную температуру металла труб пароперегревателя перед пароохладителем, находящимся в наиболее тяжелых температурных условиях.

Известно два типа пароохладителей, устанавливаемых в пароперегревателях: поверхностные и впрыскивающие.

Поверхностные пароохладители применяются на котлах среднего давления с паропроизводительностью не выше 75 т/ч. Их преимущество состоит в том, что в качестве охлаждающего агента используется деминерализованная питательная вода, поступающая в котел, часть которой направляется в пароохладитель, и после него она поступает на вход экономайзера, смешиваясь с основным потоком питательной воды.

К недостаткам поверхностных пароохладителей следует отнести следующие:

- 1) поверхностный пароохладитель обладает большой инерционностью по температуре пара при изменениях расхода охлаждающей воды, что ухудшает динамические свойства пароперегревателя в целом;
- 2) возникает возможность загрязнения пара солями питательной воды вследствие нарушений плотности вальцовочных соединений труб пароохладителя из-за переменных тепловых напряжений металла;
- 3) включение пароохладителя в питательный контур котла делает взаимосвязанными процессы регулирования температуры пара и уровня воды в барабане котла.

Обычно для снижения температуры пара на 15–20 °С через пароохладитель должно проходить 30–40 % общего количества воды, поступающей на котел. Иногда данного диапазона регулирования бывает недостаточно, поэтому приходится увеличивать расход воды через пароохладитель до 60–70 %. Это приводит к тому, что регулятор температуры будет существенно влиять на работу регулятора уровня, т. е. автоматизация управления перегревом пара затруднена и возможна только в узком диапазоне регулирования. В расширенном диапазоне используется лишь ручное регулирование.

В барабане паровых котлов для впрыска в пароохладитель используется собственный конденсат, получаемый из насыщенного пара, частично отбираемого из барабана котла и охлаждаемого питательной водой в специальном теплообменнике (конденсаторе). Получаемый конденсат стекает в конденсатосборник. Впрыск осуществляется под действием перепада давлений в конденсатосборнике и месте впрыска, а для регулирования количества впрыскиваемого конденсата используется регулирующий клапан (схема Долижаля, рис. 3.28).

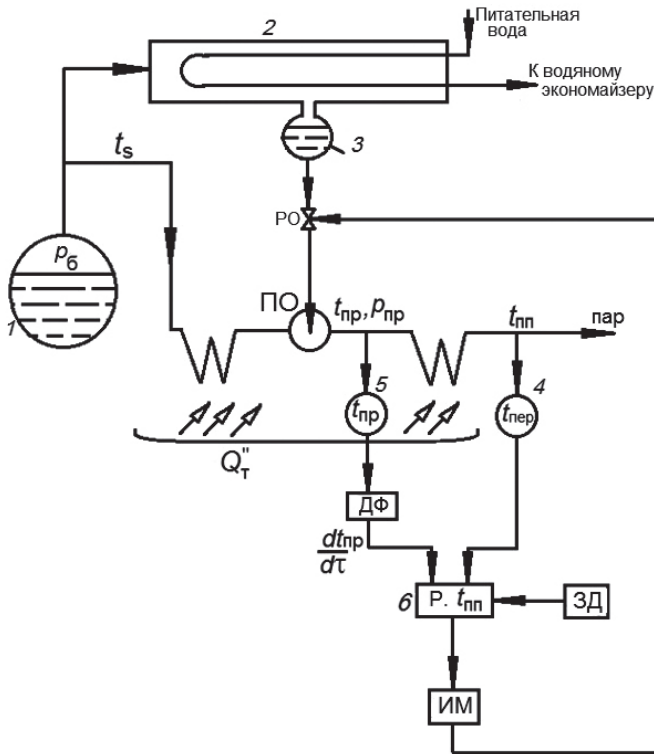


Рис. 3.28. Принципиальная схема регулирования температуры перегретого пара:

$t_s, t_{пр}, t_{пп}$ — температура насыщенного пара, в промежуточной точке и перегретого пара на выходе; $p_6, p_{пр}$ — давление в барабане и промежуточной точке; Q'' — подвод тепла от дымовых газов; РО — регулирующий орган (клапан); ДФ — дифференциатор; ПО — пароохладитель; 1 — барабан котла; 2 — теплообменник (конденсатор); 3 — конденсатосборник; 4, 5 — датчики температуры пара; 6 — регулирующий прибор; ЗД — задатчик; ИМ — исполнительный механизм

На котлах средней мощности устанавливается обычно один пароохладитель перед последней ступенью конвективного пароперегревателя, который обеспечивает поддержание температуры перегрева в заданных пределах. Общепринятой является типовая схема регулирования температуры пара по температуре пара на выходе из пароперегревателя с исчезающим импульсом из промежуточной точки за пароохладителем.

Регулятор температуры получает основной сигнал по температуре перегретого пара $t_{пп}$ на выходе из пароперегревателя и дополнительный сигнал, пропорциональный скорости изменения температуры

пара в промежуточной точке $t_{\text{пр}}$ за пароохладителем ($dt_{\text{пр}}$), который упреждает изменение температуры пара на выходе и исчезает при $\frac{dt_{\text{пр}}}{d\tau} = 0$. Это уменьшает инерционность регулируемого участка пароперегревателя и улучшает качество регулирования.

На мощных энергетических котлах с развитым пароперегревателем для улучшения температурного режима работы труб пароперегревателя применяют многоступенчатое регулирование, т. е. по ходу пара устанавливают 2–3 пароохладителя с впрысками. Каждый участок пароперегревателя после пароохладителя оснащают регулятором температуры, работающим по вышеприведенной схеме. Это позволяет более точно регулировать температуру пара и одновременно защищать металл предвключенных ступеней пароперегревателя. Если на котле имеется два потока пара, то регулирование температуры перегрева осуществляется отдельно, т. е. установка автоматических регуляторов температуры предусматривается на каждом из паропроводов.

3.8. Автоматические защиты барабанных паровых котлов

Автоматические защиты служат для предотвращения аварий работающего оборудования в случае отклонений параметров за допустимые пределы.

Защиты обычно устанавливаются для контроля наиболее ответственных параметров, отклонения которых от заданных (установленных) значений приводят к нарушению нормального технологического процесса и возникновению аварий. Защита вступает в действие тогда, когда исчерпаны возможности автоматического или дистанционного управления по предотвращению отклонений параметра свыше установленного предела, а оператор не в состоянии на это реагировать. Автоматические защитные устройства, обслуживающие котельные или тепловую часть электрической станции, называют тепловыми защитами. Они существенно повышают надежность работы котельных установок, турбин и вспомогательного оборудования.

Автоматические защиты воздействуют на объекты только в исключительных случаях, т. е. в предаварийных и аварийных режимах ра-

боты, а также при внезапных глубоких сбросах нагрузки на объекты.

Защитные устройства разделяются на два вида: местные (или локальные) и основные (или аварийные) защиты.

Местные, или локальные, защиты предотвращают развитие аварий без останова основных агрегатов (основного оборудования). Примерами местных защит могут служить следующие:

1) защита от повышения давления пара.

Каждый котел на случай повышения давления пара снабжается предохранительными клапанами, действующими по принципу регуляторов давления «до себя». Клапаны устанавливаются на барабане котла (не менее 2-х) и на выходном коллекторе пароперегревателя (для котлов с пароперегревателями пара). Суммарная пропускная способность клапанов выбирается с некоторым запасом по отношению к максимальной паропроизводительности котла на случай отказа какого-либо из клапанов. Клапаны, установленные на выходном коллекторе, должны открываться раньше тех, которые установлены на барабане, чтобы обеспечить охлаждение змеевиков пароперегревателя при работе котла.

При повышении давления сверх допустимого значения, клапаны открывают сброс пара в атмосферу. При снижении давления клапаны закрываются. Котел продолжает работать в нормальном режиме;

2) защита от повышения уровня воды в барабане котла до второго допустимого предела (+ 100 мм от нормального).

Защита открывает запорные задвижки на линии аварийного слива воды из барабана котла. При восстановлении уровня задвижки закрываются;

3) автоматическое включение резервного питательного насоса (АВР насосов). При выходе из строя одного из работающих питательных насосов (падает давление воды на нагнетании ниже допустимого предела) защита включает резервный питательный насос, а неисправный отключает;

4) защита от потускнения факела в топке (на котлах, сжигающих пылевидное топливо с низким выходом летучих). Защита срабатывает при снижении уровня светимости факела (измеряемый фоторезисторами) и воздействует на подачу резервного топлива (включение газовых горелок или мазутных форсунок). При восстановлении светимости факела резервное топливо отключается;

5) при отключении одного из двух работающих вентиляторов или дымососов защита переводит котел на пониженную нагрузку.

Основные (аварийные) защиты останавливают котел, который является основным оборудованием, т. е. отключают подачу топлива и воздуха.

Большинство современных защитных устройств включает в себя: первичные приборы по измерению параметров (датчики), снабженные электрическими контактами; усилительные устройства, промежуточные реле, устройства пуска и останова различных исполнительных механизмов (электроприводы запорных и регулирующих органов, насосов, вентиляторов, дымососов и т. п.).

Поскольку подменить действия защитных устройств в аварийных ситуациях невозможно, они должны быть более надежными, чем непрерывно действующие системы контроля и регулирования. В связи с этим логические схемы защит, определяющие последовательность срабатывания пусковых или отключающих устройств, составляют так, чтобы вероятность ложного срабатывания или отказа защит была близка к нулю.

Для уменьшения вероятности ложных действий в системах защит применяют дублирование датчиков, электрические контакты которых соединяются по схемам «два из двух» или «два из трех» (рис. 3.29, *а* и *б*).

При схеме включения контактов «два из трех» выходной сигнал первичных приборов поступит в схему защиты только при одновременном срабатывании не менее двух датчиков в любой комбинации, а в схеме «два из двух» — при одновременном срабатывании двух датчиков.

Для повышения надежности действия защитных устройств при аварийных отключениях напряжения переменного тока, в системе собственных нужд используют аккумуляторную батарею, которая подключается для питания цепей защит.

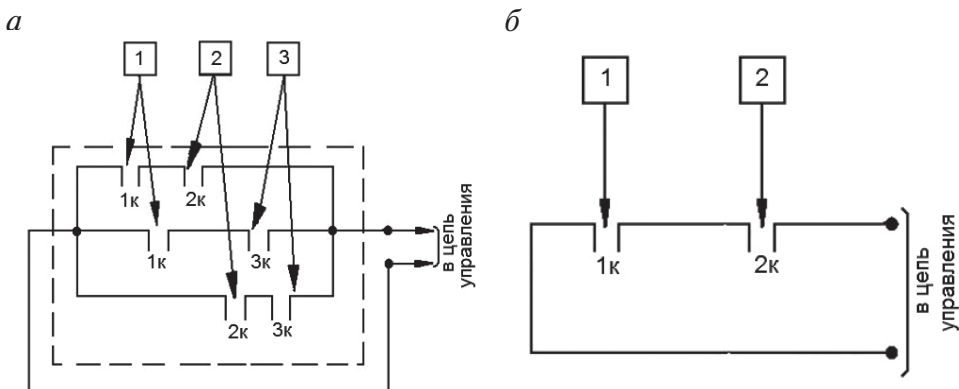


Рис. 3.29. Схемы включения датчиков защиты:

а — «два из трех»; *б* — «два из двух» (1–3 — датчики; 1к, 2к, 3к — контакты)

Действие тепловой защиты обычно увязывается с электрической блокировкой, позволяющей включать и отключать электрические пусковые устройства вспомогательных механизмов в определенной технологической последовательности — «по цепочке». Аварийные защиты, отключающие котел, удобно разделить на две группы: защиты, связанные с нарушением нормального процесса горения топлива в топке, и защиты по отклонению основных параметров.

Нарушение нормального процесса горения приводит к загазованности топки и газоходов, что может завершиться взрывом газов.

Защиты, связанные с нарушением процесса горения топлива, устанавливаются на всех паровых котлах и зависят от вида сжигаемого топлива.

При сжигании газа предусматриваются защиты:

- 1) по погасанию факела в горелках;
- 2) повышению и понижению давления газа перед горелками;
- 3) падению давления воздуха перед горелками;
- 4) повышению разрежения в топке;
- 5) исчезновению напряжения.

Срыв факела, повышение давления газа, разрежение в топке, которые также могут привести к срыву факела, и падение давления воздуха приводят к загазованности топки и газоходов котла и могут привести к взрыву газа. Понижение давления газа приводит к затягиванию факела в горелку и выходу ее из строя.

При сжигании мазута предусматриваются защиты:

- 1) по погасанию факела в топке;
- 2) падению давления мазута;
- 3) падению давления воздуха;
- 4) повышению разрежения в топке;
- 5) исчезновению напряжения.

При сжигании пылевидного твердого топлива предусматриваются защиты:

- 1) по погасанию факела в топке;
- 2) падению давления воздуха;
- 3) повышению разрежения в топке;
- 4) исчезновению напряжения.

При слоевом сжигании твердого топлива предусматривается защита:

- 1) по падению давления воздуха;
- 2) повышению разрежения в топке;
- 3) исчезновению напряжения.

Основными параметрами на барабанных паровых котлах являются:

- 1) защита по повышению и понижению уровня воды в барабане (так называемые «перепитка» и «упуск» уровня);
- 2) защита по повышению и понижению температуры перегретого пара.

При срабатывании аварийной защиты отключается подача воздуха и топлива, но дальнейший останов котла, включающий целый ряд последовательных операций, производится по блокировкам.

Рассмотрим логическую схему действия защит и блокировок при останове котла на примере защит котла по уровню.

Основным режимом работы котла является режим нормальной эксплуатации, при котором управление основными параметрами осуществляется системами автоматического регулирования, в том числе и регулятором уровня воды в барабане котла, задачей которого является поддержание уровня воды при внешних (со стороны расхода пара) и внутренних (со стороны подачи топлива, питательной воды и т. п.) возмущениях в допустимых пределах. В случае отказа регулятора или ошибочных действий оператора при ручном управлении уровень может отклоняться за допустимые пределы. Поскольку упуск уровня или перепитка котла водой относятся к самым тяжелым авариям в котельной или на ТЭС, каждый котел оснащается автоматической защитой, включающей в себя сигнализацию по отклонению уровня, локальную и аварийные защиты.

На барабанных паровых котлах можно выделить примерно 5 значений отклонения уровня от заданного нормального значения H_0 , которые устанавливаются при наладочных испытаниях котла или по требованиям котлостроительных заводов:

$$H_1 = + 70 \text{ мм вод. ст.};$$

$$H_2 = - 70 \text{ мм вод. ст.};$$

$$H_3 = + (100 \dots 120) \text{ мм вод. ст.};$$

$$H_4 = + 150 \text{ мм вод. ст. — перепитка};$$

$$H_5 = - 120 \text{ мм вод. ст. — упуск}.$$

При отклонениях уровня на (± 70) мм (H_1 и H_2) срабатывает предупредительная светозвуковая сигнализация. При отклонении уровня на H_3 включается в работу локальная защита, открывающая аварийный слив из барабан котла. При отклонениях уровня H_4 и H_5 включается аварийная защита, останавливающая котел (отключает подачу воздуха и топлива). Дальнейший останов котла производится по автоматическим блокировкам.

На рис. 3.30 представлена логическая схема защиты и сигнализации по уровню воды в барабане котла с включением элементов блокировок по останову.

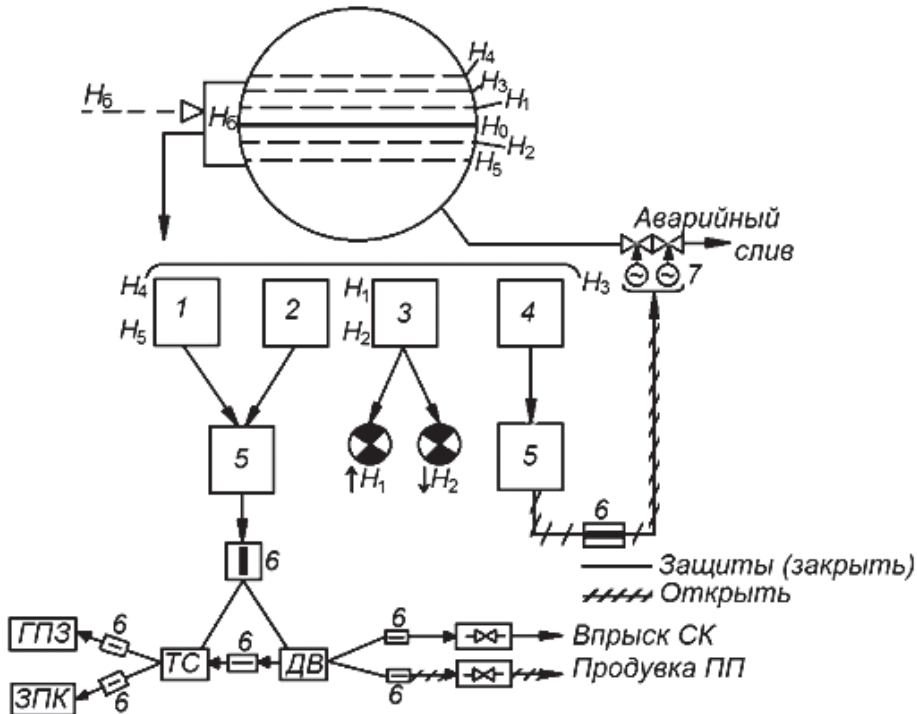


Рис. 3.30. Схема защиты и сигнализация котла по уровню воды в барабане:

- ГПЗ — главная паровая задвижка; ЗПК — запорный питательный клапан;
- ТС — топливоподающая система; ДВ — дутьевой вентилятор;
- ПП — пароперегреватель; СК — собственный конденсат; 1–4 — приборы по измерению уровня с сигнальными контактами; 5 — первичные реле, входящие в электрическую схему защит; 6 — переключатели блокировок; 7 — контактор «открыть» электроприводы задвижек аварийного слива

Аварийные защиты выполнены по схеме «два из двух», для чего используются сигнальные контакты по повышению и понижению уровня от двух приборов 1 и 2. Измерительный прибор 3 используется для предупредительной сигнализации (показаны сигнальные лампы), а от прибора 4 срабатывает локальная защита по уровню.

При перепитке (H_4) или упуске воды (H_5) замыкается электрическая цепь питания реле 5, с помощью которого через переключатель блокировки 6 срабатывают устройства, отключающие подачу топлива ТС и воздуха ДВ.

При отключении вентилятора срабатывает дополнительная блокировка на отключение подачи топлива. При отключении топлива по блокировкам производится закрытие главной паровой задвижки ГПЗ для предотвращения доступа пара в котел от общей паровой магистрали с одновременным открытием продувки пароперегревателя и закрытием впрыска собственного конденсата СК в пароохладители и запорного питательного клапана ЗПК на питательной нитке в котел.

При работе котла на газе или мазуте защита отключает подачу топлива, оставляя дутьевой вентилятор в работе для вентиляции топки и котла, тогда все вышеперечисленные переключения по останову котла будут производиться от отключения подачи топлива.

Переключатели блокировок *b* на линиях блокировочных связей между пусковыми устройствами отдельных узлов котла позволяют оператору управлять отдельными вспомогательными механизмами и запорными органами, входящими в систему защит, дистанционно с помощью ключей управления или кнопок пуска и останова во время пусковых операций или ремонтных и наладочных работ.

Аналогично выполняется защита и по другим параметрам.

Защита от погасания факела предусматривается на случай погасания факела в топке при неустойчивом горении. При погасании факела подача топлива должна быть прекращена во избежание образования взрывоопасной смеси. В качестве датчика, контролирующего наличие факела, используются фоторезисторы (фотодиоды), визируемые на факел, ультрафиолетовые датчики, ионизационные датчики, сигналы от которых усиливаются и включены в цепи питания отключающих реле. При погасании факела реле срабатывает на останов котла. Для этих целей разработаны и используются устройства защиты типа ЗЗУ (защитно-запальные устройства) и «факел».

При сжигании низкорееакционных твердых топлив в пылевидном состоянии возможно потускнение факела в топке, тогда котлы снабжаются защитой от потускнения факела, включающей подачу резервного топлива (включение газовых горелок или мазутных форсунок) при снижении уровня светимости факела. При восстановлении светимости факела защита по потускнению отключается.

Защита от понижения или повышения температуры перегрева первичного пара призвана защищать пароперегреватель котла и турбины. При понижении температуры пара ниже допустимого предела защита предохраняет пароперегреватель и проточную часть турбины от за-

броса капель воды, которые, попадая в пароперегреватель и испаряясь, увеличивают толщину отложений солей (накипь) на внутренней поверхности труб, тем самым уменьшая коэффициент теплопередачи от дымовых газов к пару, а попадая в проточную часть турбины, могут вызвать эрозию лопаток турбины и отложение солей на них.

Повышение температуры перегретого пара выше допустимого предела приводит к увеличению линейных расширений элементов проточной части турбины, уменьшению их прочности и возникновению аварийных ситуаций.

Защита по температуре перегрева первичного пара воздействует на останов дутьевого вентилятора и топлива, а далее по линиям электроблокировки на останов котла.

На барабанных паровых котлах устанавливается несколько систем защит, действующих независимо. Один из вариантов логической схемы защит барабанного парового котла большой мощности, работающего на пылевидном топливе и имеющего в своем составе два вентилятора и два дымососа, показан на рис. 3.31.

Часть защит, действующих на останов котла, снижение нагрузки или перевод на растопочную нагрузку, относится к основным защитами, а другая часть, включающая мазутные форсунки, импульсное предохранительное устройство ИПЧ или аварийный слив, является локальными защитами. Символ И в логической схеме означает условие одновременности действия двух сигналов (схема «два из двух» по параметрам). Например, при повышении давления пара должны замкнуться сигнальные контакты у двух приборов, измеряющих давление, тогда сработает локальная схема защиты и откроет импульсные предохранительные клапаны (ИПУ), сбросив давление пара.

При отключении одного вентилятора (ДВ1 или ДВ2), одного дымососа (ДС1 или ДС2) или одного вентилятора первичного воздуха в горелке (ВПВ1 или ВПВ2) защита переводит котел на снижение нагрузки (50 % нагрузки), а при отключении сразу двух вентиляторов или дымососов защита останавливает котел.

Символ Δt на схеме означает, что действие защиты происходит с выдержкой времени, необходимой для предотвращения ложного срабатывания.

Символ ИЛИ означает выбор воздействия системы защиты. Например, при останове двух вентиляторов первичного воздуха защита может по выбору или остановить котел, или перевести его на растопочную нагрузку.

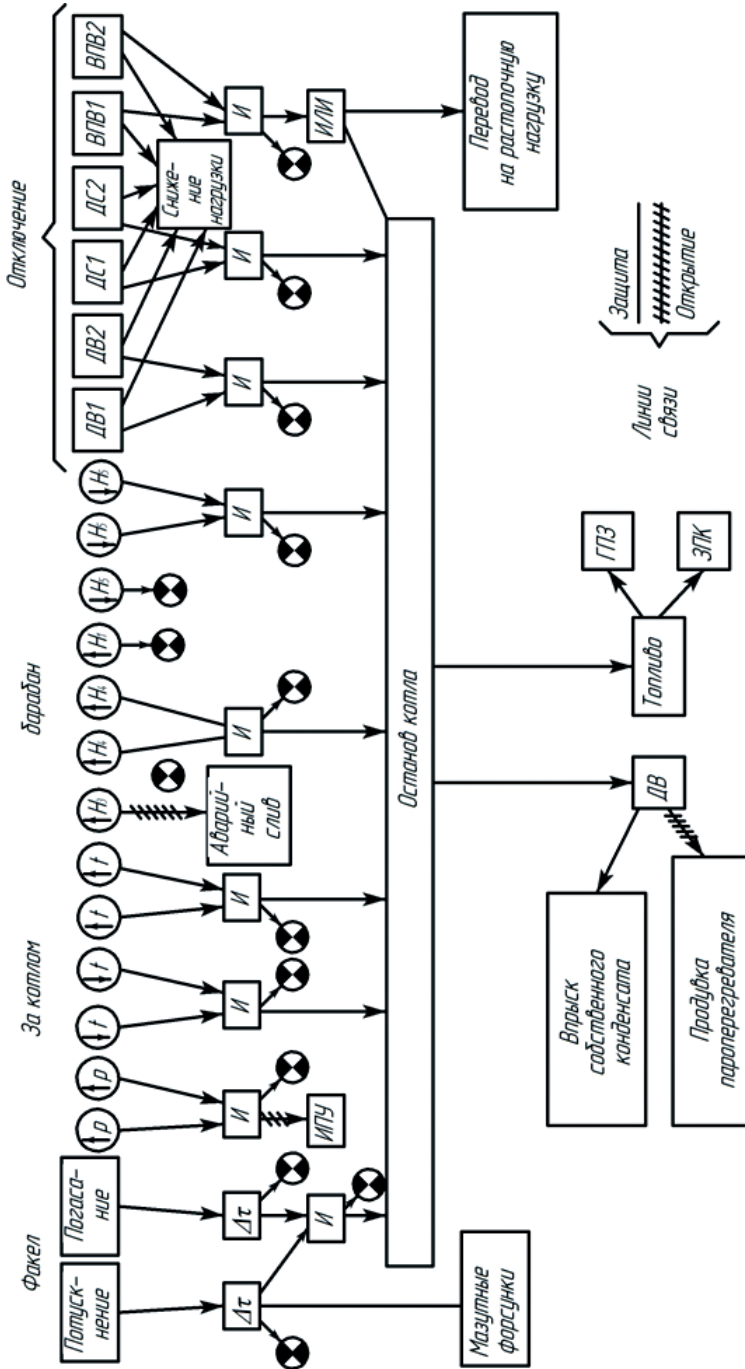


Рис. 3.31. Логическая схема действия тепловых защит барабанного котла

ГЛАВА 4. Автоматизация водогрейных котлов

Водогрейные котлы предназначены для нагрева воды, поступающей в систему теплоснабжения, которая является потребителем теплоты. Котлы представляют собой газовойодяной теплообменник, в котором нагрев воды осуществляется за счет передачи теплоты от высокотемпературных дымовых газов, получающихся при сжигании различных видов топлива (природный газ, мазут или твердое топливо). Котлы изготавливаются самых разных конструкций и компоновок: П-образные, башенные, горизонтальные водотрубные, горизонтальные жаротрубные и дымогарные, воздухоподогревателя нет. Температура воды на выходе для разных типов котлов может отличаться: 95, 105, 115, 130, 150, 180 °С — при одинаковой температуре воды на входе в котел 70 °С. Температуру воды на выходе из котла и на входе в котел необходимо регулировать.

На водогрейных котлах большой тепловой мощности, имеющих несколько горелок, применяют плавное регулирование температуры прямой воды (на выходе из котла). На котлах малой тепловой мощности, оснащенных газовыми горелками, применяют ступенчатое регулирование путем включения и отключения горелок (при двухступенчатых блочных горелках котлы переводят с режима «большого» горения на режим «малого» горения).

При централизованном теплоснабжении водогрейные котлы большой мощности могут работать с потребителем теплоты по открытой схеме (с отбором воды на горячее водоснабжение (ГВС) из системы) или по закрытой схеме (без отбора воды на ГВС). Водогрейные котлы малой мощности работают с потребителем по закрытой схеме.

зованная теплота топлива определяется по уравнению теплового баланса

$$Q_{\text{пол}} = B_{\text{т}} Q_{\text{н}}^{\text{р}} \eta_{\text{ка}} = G_{\text{пр}} \bar{c}_{\text{в}} (t_{\text{пр}} - t_{\text{обр}}^{\text{к}}), \quad (4.1)$$

где $\bar{c}_{\text{в}}$ — средняя теплоемкость воды для этих температур (она изменяется незначительно).

Температура $t_{\text{обр}}^{\text{к}}$ должна быть задана (70 °С при работе котла на природном газе и твердом топливе; больше 70 °С при сжигании мазутов).

В таком случае полезно использованная теплота может со стороны воды регулироваться:

- 1) изменением расхода воды $G_{\text{пр}}$ при постоянной температуре ($t_{\text{пр}} = \text{const}$) — это количественное регулирование;
- 2) изменением температуры воды $t_{\text{пр}}$ при постоянном расходе ($G_{\text{пр}} = \text{const}$) — это качественное регулирование;
- 3) изменением температуры $t_{\text{пр}}$ и расхода воды $G_{\text{пр}}$ — это качественно-количественное регулирование.

В системах централизованного теплоснабжения достаточно большой мощности используют качественное регулирование на источнике теплоты (котлах) и вызвано это тем, что на работу котлов накладывается два ограничения по изменению расходов воды: G_{max} и G_{min} .

Максимальный расход воды G_{max} ограничен минимально допустимым давлением прямой воды $p_{\text{пр}}^{\text{min}} = p_{\text{н}} - \Delta p_{\text{к}}^{\text{max}}$, при котором наиболее удаленные участки тепловой сети у потребителя еще будут получать теплоту на отопление и вентиляцию с учетом водоразбора на ГВС.

Минимальный расход воды G_{min} ограничен максимально допустимой температурой прямой воды $t_{\text{пр}}^{\text{max}} = t_{\text{с}} - 20$ °С, где $t_{\text{с}}$ — температура кипения воды при давлении $p_{\text{пр}}$. Это позволяет избежать вскипания воды в конечных участках котла и, как следствие, аварии на котле.

При непосредственном подсоединении потребителя к источнику теплоснабжения тепловая нагрузка у потребителя регулируется на источнике (на водогрейных котлах).

Разность расходов $\Delta G = G_{\text{пр}}^{\text{max}} - G_{\text{пр}}^{\text{min}}$ составляет порядка $0,3 G_{\text{ном}}$, где $G_{\text{ном}}$ — номинальный расход воды на котел. В связи с таким небольшим диапазоном допустимых изменений расходов и в целях стабилизации гидравлического режима работы тепловой сети, на водогрейных котлах используют качественное регулирование тепловой нагрузки. Количественное регулирование может быть только ручным — уста-

навливают необходимый расход воды $G_{пр}$, который в дальнейшем является постоянным.

Необходимые регуляторы водогрейных котлов. Поскольку в водогрейных котлах могут сжигаться различные виды топлива, требуется регулировать процесс горения в топке так же, как и на паровых котлах. Следовательно, необходимо установить на котлах, оснащенных вентилятором и дымососом, следующие регуляторы: регулятор тепловой нагрузки (РТН); регулятор общего воздуха (регулятор экономичности); регулятор тяги (регулятор разрежения в топке котла).

Способ регулирования тепловой нагрузки водогрейного котла следует из уравнения теплового баланса (4.1). При постоянном расходе воды $G_{пр}$ и постоянной температуре обратной воды перед котлом $t_{обр}^к$ тепловая нагрузка определяется заданным значением температуры прямой воды $t_{пр}$, которая достигается подачей требуемого расхода топлива B_T , сжигаемого в котле. Температура прямой воды задается по режимной карте котла. Следовательно, регулятор тепловой нагрузки должен измерять температуру прямой воды, сравнивать ее с заданной и управлять подачей топлива на котел (рис. 4.2). Поэтому такой регулятор часто называют регулятором топлива.

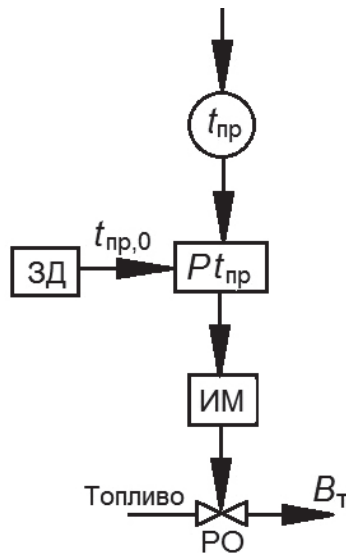


Рис. 4.2. Упрощенная структурная схема регулятора тепловой нагрузки водогрейного котла

На водогрейных котлах большой мощности, оснащенных рядом горелок, применяют плавное регулирование температуры изменением расхода топлива по пропорционально-интегральному закону (ПИ-закон) регулирования. На котлах небольшой мощности, оснащенных блочными горелками, применяют позиционное регулирование температуры воды путем переключения работы горелок с «большого» горения на «малое» горение.

На котлах большой мощности регулирование экономичности сжигания топлива (РЭК) строится так же, как и в паровых котлах, по соотношению «расход теплоты — расход воздуха» с коррекцией по содержанию свободного кислорода в уходящих дымовых газах.

При сжигании природного газа импульсом по теплу является расход газа, который можно косвенно определить по давлению его перед горелками, а импульсом по расходу воздуха является давление воздуха на нагнетании вентилятора.

Структурная схема регулирования экономичности водогрейного котла, сжигающего природный газ (рис. 4.3) строится по соотношению расхода газа (p_r) и расхода воздуха (p_v).

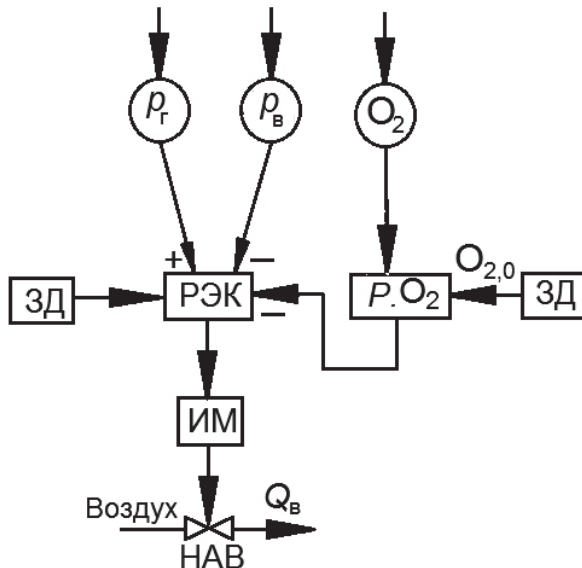


Рис. 4.3. Структурная схема регулирования экономичности водогрейного котла, сжигающего газ

Импульсы от этих датчиков включены встречно (\pm). При изменении расхода газа на котел в результате срабатывания регулятора тепловой

нагрузки, расход газа изменяется, и на входе в РЭК появляется сигнал на изменение расхода воздуха Q_v . При достижении расходом воздуха значения, соответствующего полному сжиганию нового расхода газа, импульсы от датчиков по p_r и p_v одинаковы и на входе в РЭК импульсы по разности расходов нет. Регулятор отключает ИМ, следовательно, установлен новый баланс между расходами газа и воздуха. Это означает, что регулятор быстро установил баланс расходов газа и воздуха. За это время при отклонении содержания свободного кислорода в дымовых газах O_2 от расчетного (заданного) значения $O_{2,0}$ регулятор $P.O_2$ подает корректирующий импульс на РЭК, точно регулируя расход воздуха.

При сжигании мазута или твердого топлива расход теплоты измеряется косвенным способом по разности температур прямой воды из котла и обратной воды перед котлом ($t_{пр} - t_{обр}^k$). В таком случае структурная схема РЭК будет иметь вид, представленный на рис. 4.4.

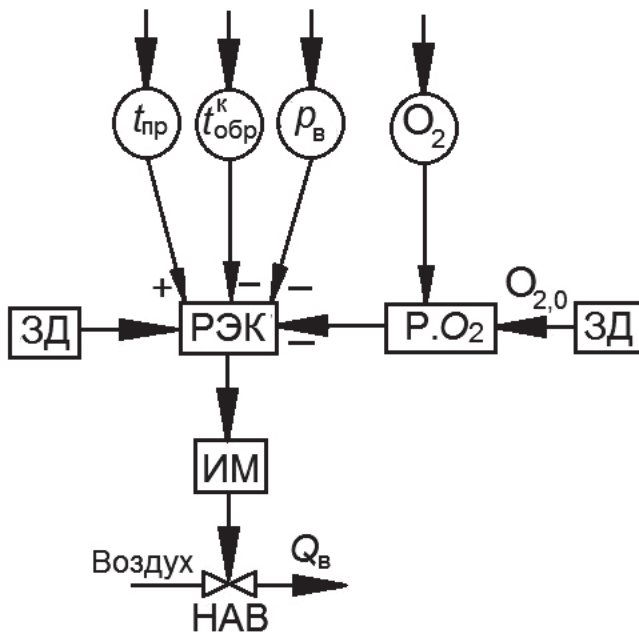


Рис. 4.4. Структурная схема РЭК водогрейного котла, сжигающего мазут или твердое топливо

При частотном управлении работой двигателя вентилятора РЭК будет изменять число оборотов двигателя как наиболее экономичный способ регулирования расхода воздуха.

На котлах малой мощности, оснащенных горелками с блоками управления подачи газа и воздуха со встроенным индивидуальным вентилятором, регулирование экономичности производится начальной настройкой соотношения «газ—воздух» при работе горелки в режимах «большого» и «малого» горения. При переключении расхода газа на «малое» горение, скорость двигателя вентилятора устанавливается на значениях, обеспечивающих расход воздуха для экономичного сжигания газа.

На котлах, оснащенных дымососом, требуется установить автоматическое регулирование разрежения в топке котла (20—40 Па), как и в паровых котлах. Регулятор разрежения строится так же, как и в паровых котлах, т. е. он измеряет разрежение в топке и управляет направляющим аппаратом дымососа или изменением скорости вращения двигателя дымососа при частотном управлении.

На котлах малой мощности, оснащенных блочными горелками с встроенным вентилятором, регулировать разрежение не требуется, поскольку котлы работают под поддувом, и давления, создаваемого вентилятором, достаточно для удаления продуктов сгорания через дымовую трубу.

Контроль технологических параметров и защиты водогрейных котлов.

Для водогрейных котлов следует предусматривать приборы для измерения следующих параметров:

- 1) температуры воды на входе и выходе из котла;
- 2) давления воды на входе в котел и выходе из котла;
- 3) температуры уходящих газов;
- 4) давления воздуха после вентилятора и у горелок;
- 5) разрежения в топке и перед дымососом;
- 6) расхода воды через котел;
- 7) расхода жидкого и газообразного топлива;
- 8) содержания кислорода в уходящих газах.

Для водогрейных котлов, сжигающих газообразное или жидкое топливо, защиты можно, как и в паровых котлах, разделить на защиты, связанные с нарушением процесса горения топлива, и защиты по параметрам воды на выходе из котла. Защиты при нарушениях процесса горения такие же, что и в паровых котлах.

Защиты по параметрам воды:

- 1) повышение температуры воды на выходе из котла;

- 2) повышение и понижение давления воды на выходе из котла;
- 3) уменьшение расхода воды через котел.

Для котлов с температурой воды 115 °С и ниже при понижении давления за котлом и уменьшении расхода воды через котел не предусматривается автоматическое отключение подачи топлива к горелкам.

В настоящее время разработаны различные комплекты средств управления (КСУ) работой котлов, как водогрейных, так и паровых малой мощности, работающих на жидком и газообразном топливе низкого и среднего давления, а также разные автоматические системы управления технологическими процессами (АСУ ТП), различающиеся структурой, техническими средствами и выполняемыми функциями. Фактически все они выполняют одни и те же задачи по управлению работой котлов, а именно: автоматическое включение котлов в работу, вывод их на рабочий режим, автоматическое регулирование необходимых параметров (например, регулирование процесса горения топлива), обеспечение безопасности работы котла при выходе параметров за допустимые пределы, останов котла. Рассмотрим их работу на примере комплекта средств управления (КСУ) и простейшей АСУ ТП.

Для водогрейных котлов комплект средств управления выпускается в двух модификациях: КСУ-1-Г-2 для низкого и КСУ-1-Г-3 для среднего давления газа.

Для паровых котлов имеется три модификации комплекта: для котлов с естественной циркуляцией, работающих под разрежением, КСУ-2 П-1-Г, для котлов с естественной циркуляцией, работающих под наддувом, КСУ-2 П-2-Г и для прямоточных котлов, работающих под наддувом, КСУ-2 П-3-Г.

Принципиальная схема комплекта средств управления КСУ-1-Г (рис. 4.5) обеспечивает двухпозиционное регулирование температуры горячей воды на выходе из водогрейного котла, регулирование подачи воздуха и разрежения в топке.

Защита котла (автоматика безопасности) осуществляется по следующим параметрам: повышению температуры горячей воды, понижению и повышению давления газа перед горелками, понижению и повышению давления воды в котле, понижению давления воздуха перед горелками, понижению разрежения в топке, погасанию пламени горелки, исчезновению напряжения питания, неисправности блоков комплекта.

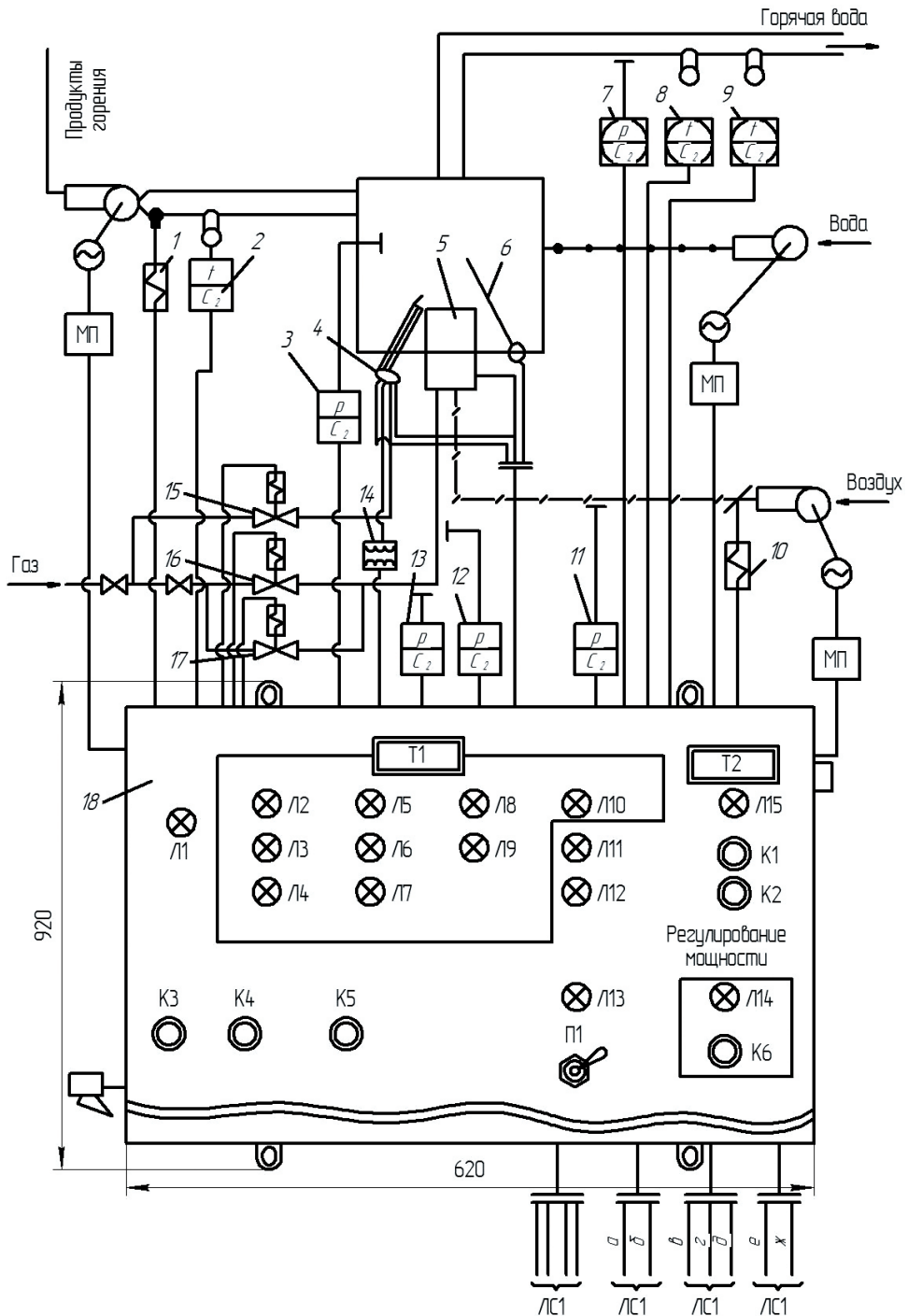


Рис. 4.5. Принципиальная схема комплекта КСУ-1-Г средств автоматического управления работой котла:

- 1, 10 — исполнительные механизмы типа ЭИМ; 2 — датчик-реле температуры;
 3, 11, 12, 13 — датчики-реле тяги, напора и давления; 4 — электрозапальник;
 5 — горелка; 6 — контрольный электрод; 7 — электроконтактный манометр;
 8, 9 — манометрические термометры; 14 — катушка зажигания;
 15 — клапан-отсекатель запальника; 16, 17 — отсечные клапаны «большого»
 и «малого» горения; 18 — шкаф комплекта; МП — магнитный пускатель;
 Т1 — табло «Авария»; Т2 — табло «Работа»; Л1–Л15 — лампы (Л1 — «Сеть»;
 Л2 — «Нет пламени»; Л3 — «Разрежение низкое»; Л4 — «Давление воздуха
 низкое»; Л5 — «Давление воды низкое»; Л6 — «Давление воды высокое»;
 Л7 — «Температура воды высокая»; Л8 — «Давление газа низкое»;
 Л9 — «Давление газа высокое»; Л10 — «Комплект неисправен»;
 Л11 — «Нет резервирования»; Л12 — «Температура отходящих газов высокая»;
 Л13 — «Котел отключен общекотельным устройством»; Л14 — «Включено»;
 Л15 — «Пуск»); К1–К6 — кнопки (К1 — «Пуск»; К2 — «Стоп»;
 К3 — «Отключение звуковой сигнализации»; К4 — «Отключение световой
 сигнализации»; К5 — «Контроль сигнализации»; К6 — «Регулирование
 мощности»); П1 — переключатель «Работа с общекотельным устройством»;
 ЛС1–ЛС4 — линии связи (ЛС1 — Питающая сеть 380/220 В, 50 Гц;
 ЛС2 — «Сигнал диспетчеру» (а — «Включение питающего напряжения»;
 б — «Авария»); ЛС3 — «Дистанционное управление» (в — «Пуск»; г — «Останов»;
 д — «Включение регулирования»); ЛС4 — «Сигналы от общекотельного устрой-
 ства регулирования» (е — «Пуск/Стоп»; ж — «Малое горение/Большое горение»));
 С₂ — самопишущий прибор; р — давление, Па; t — температура, °С

Автоматика обеспечивает: световую и звуковую аварийные сигнализации с запоминанием первопричины по каждому из аварийных параметров; предупредительную сигнализацию при нарушении работы одного из резервных каналов и при повышении температуры отходящих газов; выдачу на диспетчерский пункт сигналов о подаче питающего напряжения на комплект КСУ-1-Г и об аварийном останове котла; дистанционное включение и отключение котла, а также включение регулирования; работу общекотельного устройства регулирования; автоматические пуск и останов котла; рабочую сигнализацию. Основными элементами системы автоматики КСУ-1-Г являются шкаф 18 комплекта, в котором размещены все элементы, обеспечивающие управление пуском и остановом, регулирование, защиту, сигнализацию и т. д.; блок питания газовый; устройства розжига и контроля пламени; датчики давления, напора, тяги.

Блок питания газовый (рис. 4.6) — устройство, позволяющее проводить не только подачу и отсечку газа, но и ступенчатое регулирование расхода, а также включение или отключение газового запальника.

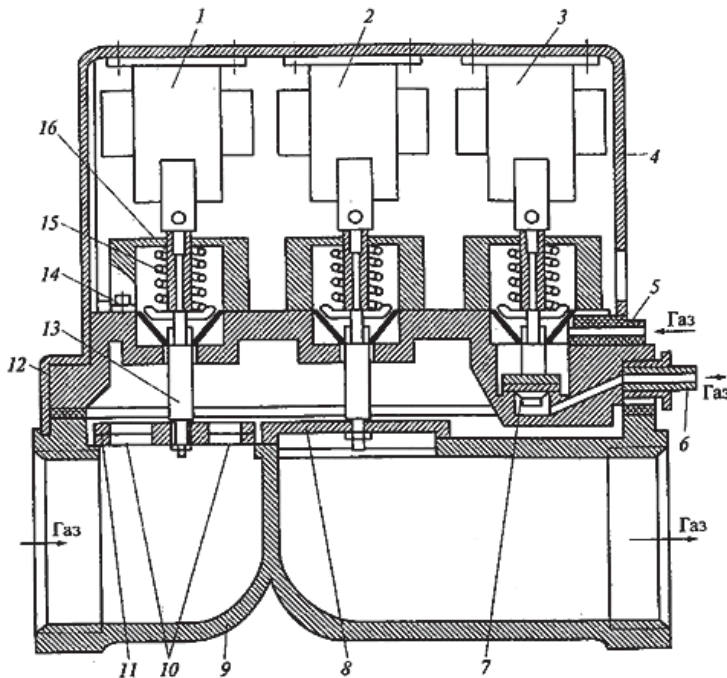


Рис. 4.6. Блок питания газовый:

- 1—3 — электромагниты; 4 — коробка; 5, 6 — штуцеры; 7 — клапан запальника;
 8 — клапан «малого» горения; 9 — корпус блока; 10 — отверстия в клапане
 «большого» горения; 11 — клапан «большого» горения; 12 — крышка;
 13, 16 — штоки; 14 — мембрана; 15 — пружина

В корпусе 9 блока имеются два отверстия с седлами, перекрываемыми клапанами «большого» 11 и «малого» 8 горения, которые могут перемещаться в основной полости крышки 12. В правой части крышки имеется дополнительная полость, в которой расположен клапан 7 запальника. Привод клапанов осуществляется специальными электромагнитами 1–3. Клапаны с помощью штоков 13 и 16 соединены с сердечниками электромагнитов и под действием пружин 15 прижимаются к седлам.

Для предотвращения проникновения газа из основной и дополнительной полостей крышки в коробку 4, где находятся электромагниты, служат мембраны 14.

В исходном положении, когда электромагниты обесточены, все три клапана находятся в закрытом положении, вследствие чего газ не подается к основной горелке и запальнику. При этом газ под действием входного давления поступает из корпуса через отверстие 10 в клапане «большого» горения в основную полость крышки и дополнительно поджимает клапан «малого» горения к седлу, обеспечивая его герметичность.

Через штуцер 5 газ подается к клапану запальника. При подаче электрического тока на электромагнит 3 в него втягивается сердечник, и за ним поднимается клапан 7, при этом газ направляется к запальному устройству через штуцер 6. Подача газа к основной горелке для ее работы на малом режиме происходит при подводе тока к электромагниту 2 и подъеме клапана 8. В этом случае расход газа определяется диаметрами отверстий 10 в клапане 11 «большого» горения. При переводе основной горелки на номинальный режим горения на электромагнит 1 подается ток и клапан «большого» горения открывается.

Автоматика регулирования. Поддержание в заданных пределах температуры воды на выходе из котла, регулирование подачи воздуха, регулирование разрежения в топке — все эти функции обеспечивает автоматика регулирования, которое может выполняться в двух режимах: совместно с общекотельным устройством регулирования и без него. Выбор режима регулирования осуществляется переключателем П1 — «Работа с общекотельным устройством» (см. рис. 4.5). При работе без общекотельного устройства датчиком в системе регулирования является контактный манометрический термометр 8.

Если температура горячей воды находится в интервале между нижним и верхним регулируемыми значениями, газ к горелке поступа-

ет через два клапана: «большого» 11 (см. рис. 4.6) и «малого» 8 горения. Заслонки на воздухопроводе и газоходе полностью открыты. В этом случае горелки котла работают со 100 %-й тепловой мощностью. Температура горячей воды при этом повышается. При достижении верхнего регулируемого уровня температуры происходит замыкание контакта манометрического термометра и электрическое питание электромагнитного клапана «большого» горения отключается. Тепловая мощность горелки снижается при этом до 40 %. Одновременно с отключением клапана «большого» горения срабатывают электрические исполнительные механизмы типа ЭИМ 1 и 10 (см. рис. 4.5), перекрывая частично воздуховод и газоход, т. е. обеспечивая необходимые расход воздуха и разрежение в топке.

При работе с общекотельным устройством комплект КСУ-1-Г выполняет следующие команды: сигнал на пуск котла; сигнал на останов котла; сигнал на установку 100 % тепловой мощности; сигнал на установку 40 % тепловой мощности горелки и соответствующее этой нагрузке прикрытие заслонок на воздушной и дымовой линиях.

Далее приводятся параметры работы котла, по которым осуществляется его защита, и используемые при этом датчики:

- 1) температура горячей воды — электроконтактный манометрический термометр 9 (см. рис. 4.5) типа ТПГ-СК;
- 2) давление газа — датчик верхнего уровня (электроконтактный манометр ЭКМ-1V с датчиком-реле давления 13 типа ДД-06-11К) и датчик нижнего уровня (датчик-реле давления 13 типа ДД-06-11К);
- 3) давление воздуха — датчик-реле напора 11 типа ДН-250-11К;
- 4) разрежение в топке — датчик-реле тяги 3 типа ДЕ-40-11К;
- 5) давление воды — электроконтактный манометр 7 типа ЭКМ-1V;
- 6) погасание пламени — контрольный электрод 6 типа КЭ.

При срабатывании датчиков, контролирующих параметры безопасности, а также при исчезновении напряжения питания исполнительные реле обесточиваются, разрывая цепи питания электромагнитных клапанов «большого» и «малого» горения, и подача газа к котлу прекращается. Одновременно загораются световое табло Т1 «Авария» и сигнальная лампа первопричины аварии, замыкается цепь питания звукового сигнала.

Звуковой сигнал отключают нажатием кнопки КЗ «Отключение звуковой сигнализации». После сброса сигнализации и остановочной вен-

тиляции комплект вновь готов к работе, но его запуск возможен только с помощью кнопки К1 «Пуск», а не дистанционно.

Перед началом работы комплекта необходимо выставить на наборном поле временные выдержки (программу работы автоматики), определяющие затраты времени на проведение ряда операций: включение приборов контроля разрежения; понижение давления воды и воздуха; предварительную вентиляцию топки; розжиг запальника и основного факела; получение устойчивого горения основного факела; прогрев котла; послеостановочную вентиляцию.

Перед каждым пуском необходимо (см. рис. 4.5): включить автоматический выключатель (при этом загорается лампа Л1 «Сеть»), проверить исправность световой и звуковой сигнализаций нажатием кнопки К5 «Контроль сигнализации», убедиться в отсутствии аварийных параметров, выбрать режим работы комплекта (с общекотельным устройством или без него) путем установки переключателя П1 в соответствующее положение.

Для пуска котла необходимо нажать кнопку К1 «Пуск», и комплект начинает обрабатывать программу розжига в определенной последовательности:

- 1) ставится под контроль отсутствие аварийного состояния температуры и давления воды и включаются электродвигатели вентилятора, дымососа, циркуляционного насоса;
- 2) заслонки на воздуховоде и газоходе открываются полностью (на 100 %) и проводится вентиляция топки и газоходов;
- 3) начинается цикл розжига запальника;
- 4) подается питание на катушку зажигания 14 типа Б-115 и открывается электромагнитный клапан запальника, включается контроль действия устройства защиты по погасанию пламени; после поступления сигнала о наличии пламени запальника подается питание на электромагнитный клапан «малого» горения; после отсчета определенного времени отключается контрольный электрод пламени запальника и подключается контрольный электрод горелки; загорается световое табло Т2 «Работа» и гаснет лампочка Л15 «Пуск»; отсчитывается время на достижение устойчивого горения факела и отключается электромагнитный клапан запальника; осуществляется прогрев котла, и котел готов к регулированию мощности. Включение кнопки К6 «Регулирование мощности» в режиме работы без общекотельного устройства

осуществляется после включения светового табло Т2 «Работа» по истечении времени, указанного в инструкции по эксплуатации котла.

Для останова котла оператору достаточно нажать на кнопку К2 «Стоп», а при полном окончании работы — отключить автоматический выключатель сети.

Управление работой котла с помощью программно-технического комплекса (АСУ ТП). Автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУ ТП) могут быть самыми разнообразными: простейшие, выполняющие несложные цели управления, оснащенные микропроцессорной техникой с ограниченными функциями (контроллеры), сложные, выполняющие разнообразные задачи управления с использованием универсальных микро- или мини-ЭВМ и т. п. Выполняемые ими задачи и их последовательность заложены в программно-технических комплексах (ПТК).

Рассмотрим в качестве примера АСУ горелочными устройствами котельного агрегата. Объектом управления являются горелочные устройства котельного агрегата. Четыре горелки расположены на фронтальной стене в два яруса. К каждой горелке подведены газ и воздух с помощью трубопроводов, снабженных задвижками с электроприводами. Горелки оснащены запально-защитными устройствами (ЗЗУ) факелов запальника и основного факела. Розжиг горелок и их выключение проводятся с заданной очередностью. Операции по управлению арматурой и ЗЗУ выполняются в последовательности, определенной технологическим регламентом. Система выполняет в автоматизированном режиме совокупность информационно-вычислительных и управляющих функций. Информационно-вычислительные функции:

- 1) информация о ходе технологического процесса и состоянии оборудования (режимы управления, положение арматуры и др.);
- 2) сигнализация о нарушениях технологического процесса.

Информация о работе оборудования выводится на средства отображения автоматически или по запросу машиниста котла. Применяется следующий принцип представления информации: сначала выдается групповой сигнал о появлении нарушения, а затем (после вызова видеокadra с нарушением) указывается место и характер нарушения на вызванном видеокadre.

Управляющие функции АСУ ТП:

- 1) программное логическое управление технологическими операциями по розжигу и управлению горелок;
- 2) автоматическая защита и блокировка;
- 3) дистанционное управление исполнительными механизмами (ИМ) с автоматизированного рабочего места (АРМ) на блочном щите управления (БЩУ) с помощью функциональной клавиатуры (ФК);
- 4) управление ИМ с местных щитов управления (МЩУ), индивидуальных для каждой горелки.

Структурная схема автоматической системы управления АСУ ТП, приведенная на рис. 4.7, содержит:

- 1) АРМ машиниста на БЩУ, выполненной на базе ПЭВМ, снабженной ФК;
- 2) программируемый логический контроллер (микропроцессорный регулятор), в схеме указан контроллер ТСМ-51;
- 3) релейные блоки КУС, служащие для преобразования сигналов с напряжением 220 В, формируемых конечными выключателями ИМ, в сигналы с напряжением 24 В, поступающие на входы в контроллеры, а также для преобразования выходных сигналов контроллеров с напряжением 24 В в сигналы с напряжением 220 В, подаваемые на входы магнитных пускателей электродвигателей задвижек;
- 4) МЩУ, предназначенные для управления ИМ горелок по месту.

Контроллер ТСМ-51 имеет сравнительно небольшую информационную мощность, поэтому и используется в данной схеме для управления работой только двух горелок. Если котельный агрегат снабжен четырьмя горелками, то для их управления необходимо иметь два контроллера и т. д.

Контроллеры объединены между собой и ПЭВМ линией связи. Сигналы в систему поступают от аналоговых датчиков типа ДА (указатели положения шибберов на воздушных линиях горелок) и дискретных датчиков типа ДД (конечные выключатели, датчики наличия факела).

На БЩУ установлены ПЭВМ с дисплеем и управляющая ФК, сигналы от клавиш которой воспринимаются и обрабатываются специальным программным пакетом, используемым для организации АРМ машиниста. Лицевая панель ФК представлена на рис. 4.8. С этой клавиатуры можно осуществлять дистанционное ДУ и местное МУ управление.

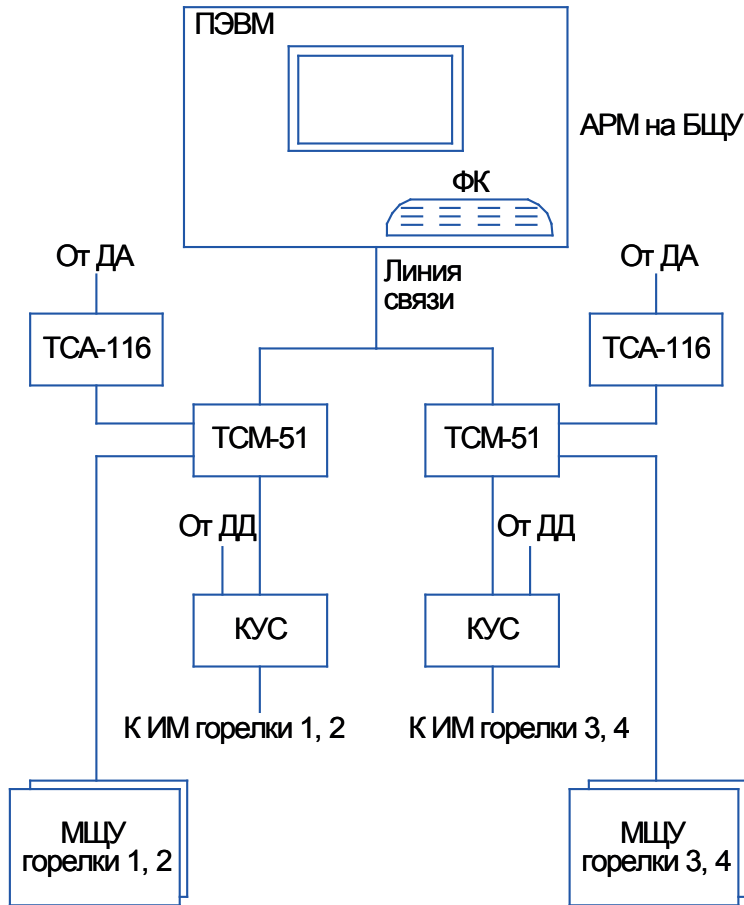


Рис. 4.7. Структурная схема автоматической системы управления АСУ ТП:

ПЭВМ — персональная электронно-вычислительная машина;
 ТСМ — программируемый логический контроллер; ТСА — блок ввода аналоговых сигналов от аналоговых датчиков ДА; КУС — релейный блок (преобразователь сигналов); АРМ — автоматизированное рабочее место; БЩУ — блочный щит управления; ФК — функциональная клавиатура; ДД — дискретный датчик; МЩУ — местные щиты управления; ИМ — исполнительный механизм

При включении системы на экран дисплея автоматически вызывается обзорная мнемосхема, где условно изображены горелки нижнего и верхнего ярусов с указанием их номеров, отмечено, на каких горелках имеется факел, показаны расходы газа (мазута) и воздуха на отдельную горелку или группу горелок.

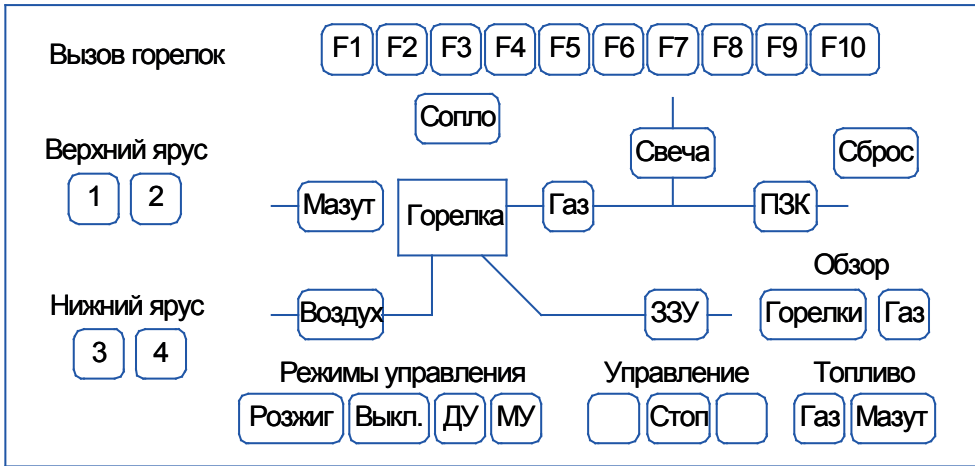


Рис. 4.8. Лицевая панель функциональной клавиатуры (ФК):

F1–F10 — программы вызова горелок; 3ЗУ — запально-защитное устройство; ПЗК — предохранительный запорный клапан; ИМ — исполнительный механизм; ДУ, МУ — соответственно дистанционное и местное управление; Выкл. — выключено

При нажатии на любую из кнопок F1–F10 из группы «Вызов горелок» на экран выводится мнемосхема горелочного устройства с изображением вызванной горелки соответствующего номера и относящихся к ней исполнительных механизмов. Например, на рис. 4.9 показана мнемосхема горелки 1, вызванная нажатием кнопки F1 на ФК (см. рис. 4.8). Кнопки «Мазут», «Воздух», «Сопло», «Газ», «Свеча», «3ЗУ» и «ПЗК», расположенные на ФК, служат для вызова ИМ данной горелки. Кнопки «▲», «Стоп», «▼» группы «Управление» используются для открывания–закрывания вызванной задвижки или включения и отключения 3ЗУ. Четыре кнопки из группы «Режимы управления» используются в целях задания для вызванной горелки одного из режимов: «Розжиг», «Выкл.» (выключение), ДУ (дистанционное управление), МУ (местное управление). При задании режима «Розжиг» необходимо с помощью одной из кнопок группы «Топливо» указать вид используемого топлива («Газ» или «Мазут»).

Посредством двух кнопок группы «Обзор» можно вызвать стартовую обзорную мнемосхему (рис. 4.10), содержащую обобщенную информацию по всем четырем горелкам (на рис. 4.8 кнопка «Горелки»), или таблицу, в которой сведена информация о положении всех горелок (кнопка «ИМ»).

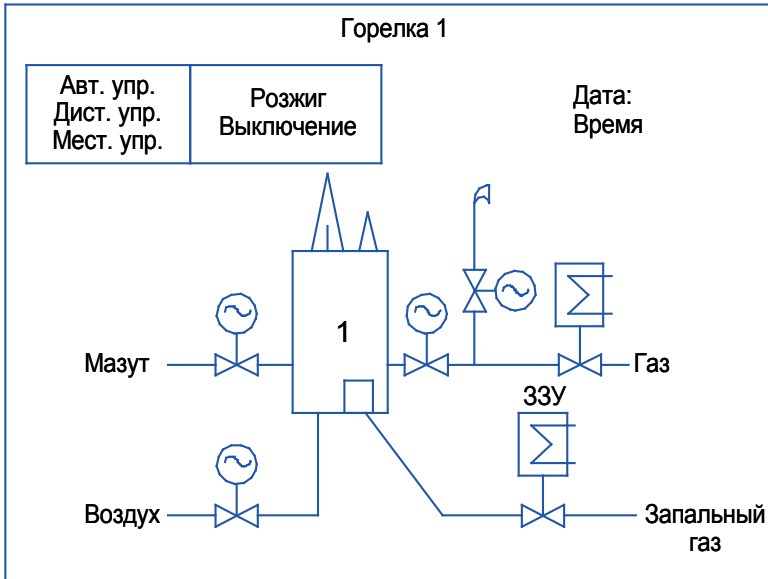


Рис. 4.9. Мнемосхема горелки 1, вызванная нажатием кнопки F1 на функциональной клавиатуре:

Авт. упр., Дист. упр., Мест. упр. — выбор соответственно автоматического, дистанционного и местного управления

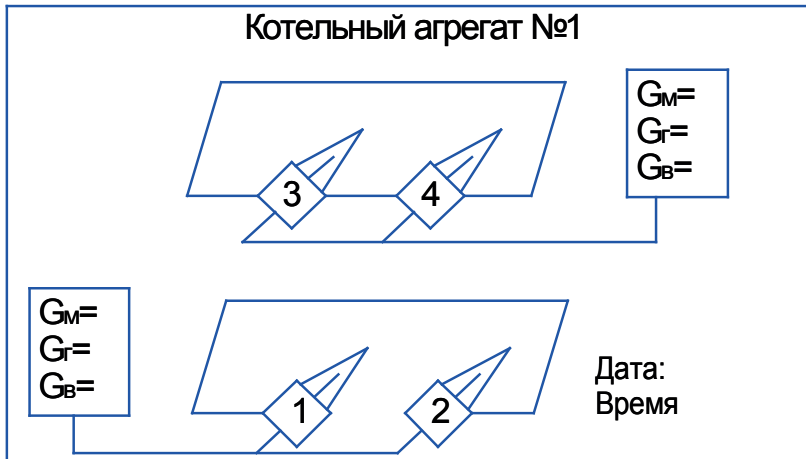


Рис. 4.10. Стартовая обзорная мнемосхема:

1–4 — горелки; G_M , $G_Г$, $G_В$ — расходы мазута, газа и воздуха

С помощью кнопок на панели ФК из группы «Режимы управления» для вызванной горелки (в нашем случае для горелки 1) могут быть заданы автоматический розжиг, автоматическое выключение, ДУ или МУ. В последнем случае переключение ИМ для данной горелки может проводиться только с МЩУ (см. рис. 4.7).

Заданный режим управления указывается в левом верхнем углу экрана (см. рис. 4.9). Для управления ИМ в режиме ДУ необходимо его вызвать нажатием соответствующей кнопки, расположенной на мнемосхеме горелочного устройства на ФК.

Управление ИМ с МЩУ осуществляется поворотом ключей, расположенных на его панели.

Регулирование температуры обратной воды перед водогрейным котлом. Помимо рассмотренных выше регуляторов, обеспечивающих нормальный процесс сжигания топлива в топке, необходимо обеспечить нормальную температуру обратной воды на входе в котел, которая при сжигании природного газа должна быть не менее $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ во избежание низкотемпературной коррозии на входных участках труб котла (см. рис. 4.1). При сжигании мазута, содержащего в своем составе серу, эта температура должна быть еще выше ($t_{\text{обр}}^{\text{к}} \approx 80\text{...}85\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Температурный график тепловой сети (95/70) или (90/70) рассчитан по наиболее холодному периоду зимы, который непродолжителен. В остальное время согласно расчетному температурному графику температура обратной воды от потребителя будет ниже $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ и ее необходимо подогревать.

В целях повышения температуры воды перед котлом устанавливают рециркуляционные насосы ($P_{\text{цН}}$) для подачи части прямой воды с высокой температурой $t_{\text{пр}}$ в обратную. При использовании рециркуляционного насоса с постоянным числом оборотов на линии нагнетания устанавливают регулирующий орган для изменения расхода рециркулирующей воды ($G_{\text{рц}}$) на смешение с обратной.

В настоящее время используют рециркуляционные насосы с частотным управлением числа оборотов двигателя, что позволяет изменить расход рециркулирующей воды изменением числа оборотов.

Регулятор температуры обратной воды перед котлом измеряет температуру $t_{\text{обр}}^{\text{к}}$ и управляет или регулирующим органом (РО), или изменением числа оборотов (рис. 4.11).

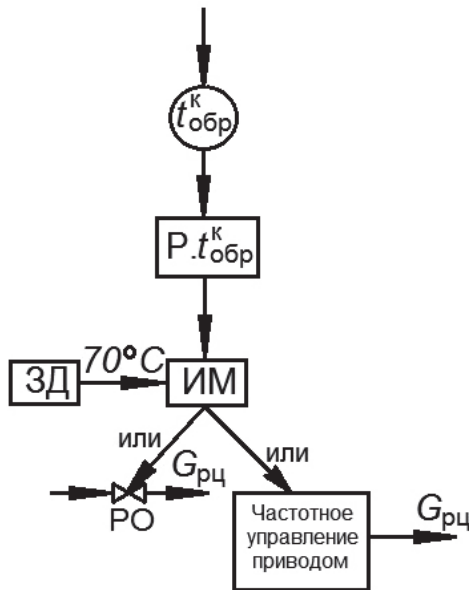


Рис. 4.11. Структурная схема регулятора температуры обратной воды перед котлом

Регулирование подпитки тепловой сети. Отбор воды из системы теплоснабжения на горячее водоснабжение в количестве $G_{ГВС}$ (см. рис. 4.1) приводит к тому, что уменьшается расход обратной воды $G_{обр}$ и, следовательно, падает давление в обратной магистрали $p_{обр}$ перед сетевыми насосами. Для восполнения потерь воды в системе необходимо в обратную магистраль подать такое же количество воды (подпитка), которое было отобрано на горячее водоснабжение ($G_{подп} = G_{ГВС}$). Это количество воды подается подпиточными насосами ПН из баков-аккумуляторов, в которых содержится подготовленная и подогретая вода.

Данный процесс автоматизируется путем установки регулятора подпитки, который измеряет давление в обратной магистрали перед сетевыми насосами $p_{обр}$ и включает подпиточный насос, который работает до тех пор, пока давление $p_{обр}$ не восстановится до расчетного значения. В открытых системах теплоснабжения разбор воды из системы на горячее водоснабжение может быть существенным в течение суток, поэтому баки-аккумуляторы содержат большой объем воды, который по мере расходования ее должен восполняться. С этой целью устанавливается автоматическая система заполнения баков-аккумуля-

ляторов подготовленной водой, которая работает от датчиков уровня (поплавковых контактных, емкостных и т. п.). При достижении нижнего уровня включается насос подачи воды, который работает до тех пор, пока не сработает датчик верхнего уровня воды в баке, отключающий насос.

Регулирование водогрейных котлов, работающих по закрытой схеме.

Технологическая схема системы теплоснабжения фактически такая же, что и открытая, за исключением того, что система подпитки предназначена только для восполнения небольших утечек воды, т. е. баки подпиточной воды имеют значительно меньший объем или вообще отсутствуют (в системах теплоснабжения малой мощности). Для горячего водоснабжения в котельных малой мощности могут быть установлены подогреватели воды для ГВС. Упрощенная технологическая схема закрытой зависимой системы теплоснабжения представлена на рис. 4.12.

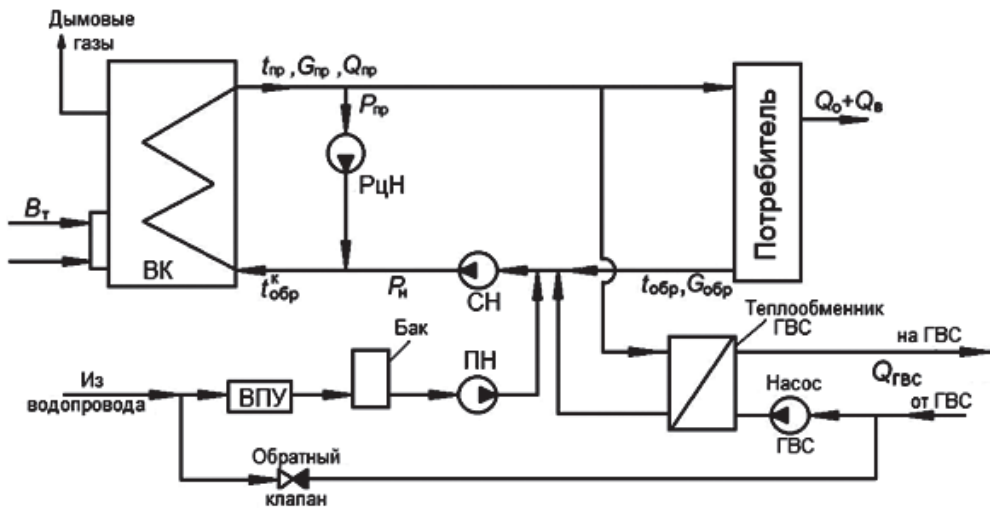


Рис. 4.12. Упрощенная схема закрытой системы теплоснабжения:

ВПУ — водоподготовительная установка; ПН — подпиточный насос

Водогрейный котел должен также обеспечивать тепловую нагрузку, определяемую по разности температур прямой воды $t_{пр}$ и обратной воды перед котлом $t_{обр}^k$ при постоянном расходе прямой воды $G_{пр}$. Следовательно, котел должен быть оснащен регуляторами: температуры

прямой воды, экономичности, разрежения и температуры обратной воды перед котлом.

Регулирование подпитки (на схеме показана подпитка водой из водопровода) должно обеспечить восполнение небольших потерь воды в системе подготовленной водой (через водоподготовительную установку ВПУ) включением подпиточного насоса (ПН) и системы горячего водоснабжения (ГВС) (работой обратного клапана, который открывается при понижении давления воды в системе ГВС вследствие водоразбора).

Регулирование отпуска теплоты потребителю в системах отопления, вентиляции и горячего водоснабжения. Все многообразие теплового потребления в системах теплоснабжения сводится к обеспечению следующих видов тепловых нагрузок:

- 1) сезонные — отопление и вентиляция, связанные с климатическими условиями;
- 2) горячее водоснабжение, слабозависящее от климатических условий (круглогодичное);
- 3) технологические — слабозависящие от климатических условий (практически постоянные).

Обеспечение требуемых тепловых нагрузок зависит от мощности системы теплоснабжения и схемы подсоединения теплоиспользующих установок к тепловой сети, которые могут быть самыми разнообразными: прямое подсоединение без подмешивания обратной воды в прямую; с подмешиванием обратной воды в зависимых открытых и закрытых системах; с установкой теплообменников на отопление, вентиляцию и ГВС в закрытых независимых системах и т. п. Каждый раз вопрос об установке необходимых регуляторов решается для конкретной выбранной схемы подключения, но основными регуляторами во всех схемах будут регулятор отопления (регулятор температуры прямой воды к потребителю) и регулятор температуры воды на горячее водоснабжение.

Рассмотрим некоторые варианты подключения потребителя к тепловой сети.

1) Прямое подсоединение. При прямом подсоединении потребителей к тепловой сети на вход теплоиспользующих установок подается вода фактически с температурой прямой воды из котла $t_{пр}$ как в открытых, так и в закрытых системах (см. рис. 4.1 и 4.12). В таком случае ре-

гулирование тепловой нагрузки на отопление и вентиляцию (регулятор отопления) производится на котлах с учетом температуры наружного воздуха. Структурная схема регулятора будет такой же, что и на рис. 4.2, с добавлением импульса по температуре наружного воздуха t_n (рис. 4.13).

В регулятор отопления (РО) закладывается программа расчета температуры прямой воды $t_{пр}$ на выходе из котла в зависимости от температуры наружного воздуха t_n , и он производит автоматический отпуск теплоты потребителю на отопление (и вентиляцию), изменяя расход топлива B_T на котел. При срабатывании регулятора отопления срабатывают регуляторы экономичности и разрежения.

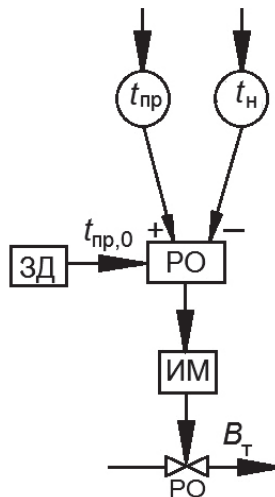


Рис. 4.13. Структурная схема регулирования температуры прямой воды к потребителю на водогрейных котлах

2) Подсоединение с подмешиванием обратной воды. Надежная и стабильная работа водогрейных котлов как источника теплоты производится при номинальных параметрах, т. е. при постоянной температуре прямой воды, на которую они рассчитаны ($t_{пр} = 95, 115, 130, 150$ °С), тогда как потребителю теплоты требуется более низкая температура воды на входе в теплоиспользующие установки (например, 95 или 90 °С для систем отопления жилых зданий). В этом случае потребитель в открытых и закрытых системах подключается к тепловой сети с подмешиванием обратной воды к прямой или через элеватор, или с помощью подмешивающего насоса с установкой регулирующих клапанов проходного типа или трехходовых (рис. 4.14).

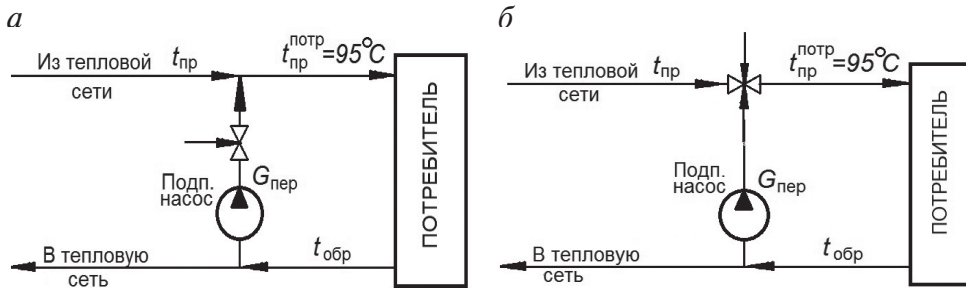


Рис. 4.14. Схема подсоединения потребителя к тепловой сети с подмешиванием обратной воды:

a — с клапаном проходного типа; *б* — с трехходовым клапаном ($G_{пер}$ — расход перепускаемой обратной воды)

В таких схемах требуется регулировать температуру прямой воды к потребителю $t_{пр}^{потр}$. С этой целью устанавливают регулятор температуры прямой воды к потребителю, который измеряет температуру $t_{пр}^{потр}$, температуру обратной воды $t_{обр}$, температуру наружного воздуха t_n и управляет регулирующим клапаном проходного типа (рис. 4.14, *a*) или трехходовым клапаном (рис. 4.14, *б*).

Структурная схема регулятора отопления (и вентиляции) будет иметь вид, как на рис. 4.15.

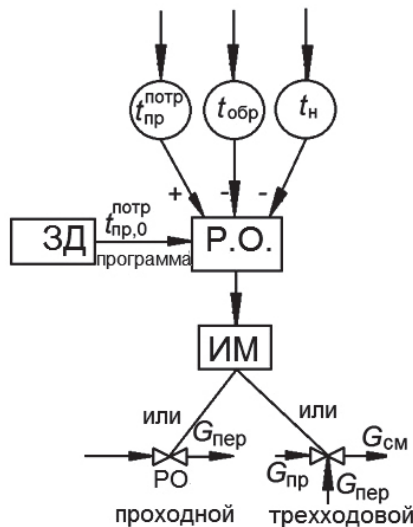


Рис. 4.15. Структурная схема регулятора температуры воды к потребителю (РО — регулятор отопления)

Регулирование отопительной нагрузки таким образом качественное, по изменению температуры воды к потребителю $t_{\text{пр}}^{\text{потр}}$.

3) Регулирование температуры воды на горячее водоснабжение (ГВС) в открытых системах. Горячее водоснабжение в открытых системах централизованного водоснабжения должно присоединяться к подающему и обратному трубопроводам тепловых сетей через регулятор смешения воды для подачи в систему ГВС воды заданной температуры $t_{\text{ГВС}}$. Циркуляционный трубопровод системы ГВС рекомендуется присоединять к обратному трубопроводу тепловой сети после отбора воды в систему ГВС, при этом на трубопроводе между местом отбора воды и местом подключения циркуляционного трубопровода предусматривается установка диафрагмы (шайбирование), рассчитанной на гашение напора, равного сопротивлению системы ГВС в циркуляционном режиме (рис. 4.16, а).

При давлении в обратном трубопроводе теплосети, недостаточном для подачи воды в систему ГВС, на трубопроводе после регулятора смешения следует предусмотреть повысительно-циркуляционный насос (рис. 4.16, б), при этом установки диафрагмы не требуется.

Температура воды на ГВС должна быть 60–65 °С. Усилия биметаллического или манометрического термометра достаточно для перемещения клапанов подачи прямой и обратной воды в устройстве смешения для поддержания этой температуры.

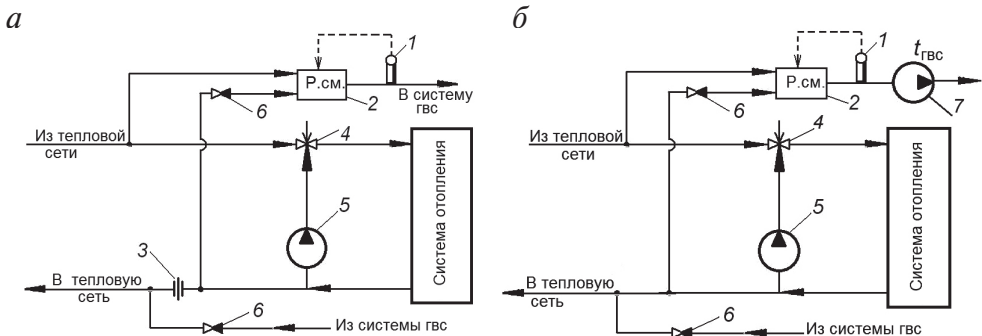


Рис. 4.16. Схема присоединения системы ГВС

при зависимом присоединении системы отопления:

а — при установке диафрагмы; б — при установке повысительно-циркуляционного насоса: 1 — термометр; 2 — регулятор смешения прямого действия; 3 — диафрагма; 4 — трехходовой клапан; 5 — повысительно-циркуляционный насос; 6 — обратный клапан; 7 — циркуляционный насос ГВС

4) Независимые закрытые системы теплоснабжения. В закрытых независимых системах теплоснабжения горячая вода на отопление, вентиляцию и горячее водоснабжение подается через теплообменники.

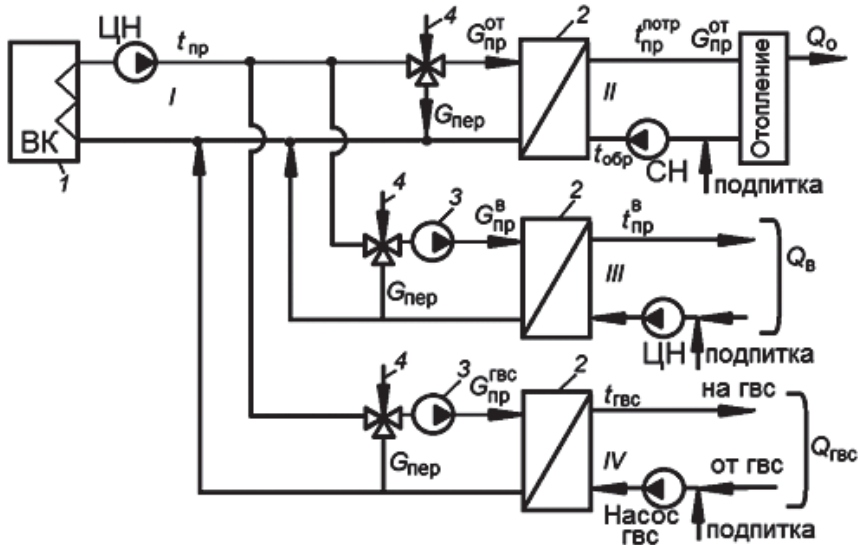


Рис. 4.17. Технологическая схема закрытой независимой системы теплоснабжения:

- I* — водогрейный котел; *2* — водоподогреватели; *3* — повысительные насосы; *4* — трехходовой клапан; ЦН — циркуляционный насос; СН — сетевой насос;
 I — котельный контур; II — контур системы отопления;
 III — контур системы вентиляции; IV — контур ГВС

4.1. Регулирование тепловой нагрузки отопления

В котельном контуре циркулирует вода с постоянным расходом и заданной температурой на выходе из котла $t_{пр}$. Постоянный температурный режим работы котла повышает надежность его работы. Контур системы отопления, вентиляции и ГВС гидравлически разъединены с котельным контуром, что также повышает устойчивость и надежность их работы. Регулирование тепловой нагрузки системы отопления производится по температуре прямой воды к потребителю $t_{пр}^{потр}$

с учетом температуры обратной воды $t_{обр}$ и наружной температуры воздуха t_n . Регулятор отопления будет управлять перепуском части прямой воды $G_{пер}$ в обратную перед водонагревателем, воздействуя на проходной клапан или на трехходовой (как показано на рис. 4.18), осуществляя количественное регулирование.

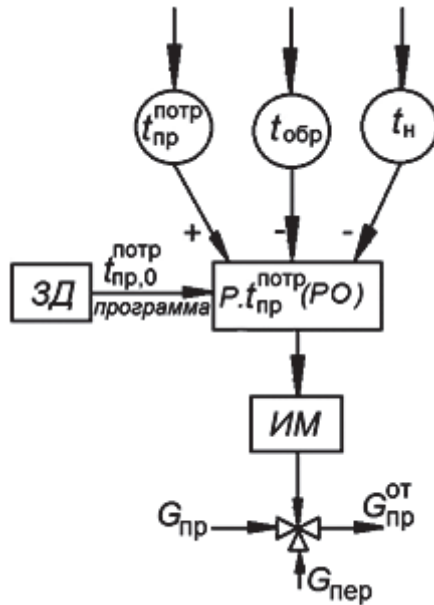


Рис. 4.18. Структурная схема регулятора подачи воды к потребителю $t_{пр}^{потр}$ (регулятора отопления РО)

В регулятор заложена программа расчета температуры $t_{пр}^{потр}$ с учетом температуры наружного воздуха t_n согласно температурному графику системы отопления. Этот регулятор иногда называют «всепогодным» регулятором.

4.2. Регулирование тепловой нагрузки вентиляции

Если системы вентиляции и ГВС выделены в отдельные контуры, то горячая вода от котельного контура к теплообменникам вентиляции и ГВС часто подается с помощью повысительных насосов (см. рис. 4.17).

В контуре вентиляции горячая вода от теплообменника поступает к калориферам воздушного отопления с температурой $t_{\text{пр}}^{\text{В}}$, а на калориферах производится местное регулирование температуры выходящего из калорифера воздуха. Следовательно, необходимо регулировать температуру воды $t_{\text{пр}}^{\text{В}}$, поступающую в контур вентиляции. Регулятор измеряет $t_{\text{пр}}^{\text{В}}$ и управляет трехходовым клапаном на подаче воды к теплообменнику вентиляции (рис. 4.19).

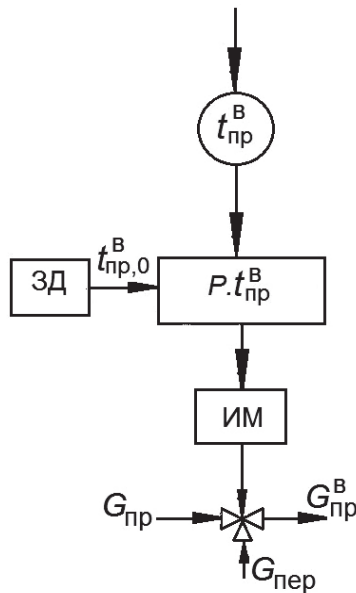


Рис. 4.19. Структурная схема регулятора температуры воды на вентиляцию

4.3. Регулирование тепловой нагрузки в системе ГВС

Системы централизованного горячего водоснабжения проектируются с циркуляционными трубопроводами для обеспечения потребителей горячей водой, так как без них при отсутствии водоразбора в подающих линиях вода быстро остывает и потребитель вынужден сливать ее, теряя при этом воду и теплоту. Циркуляционные трубопроводы и циркуляционные насосы создают непрерывное движение воды по замкнутому контуру: теплообменник, подающий трубопровод — водоразборные устройства (краны) — циркуляционный трубопровод —

теплообменник, поддерживая в системе требуемую температуру горячей воды у водоразборных кранов на уровне 50–60 °С. Требуемую температуру на выходе из теплообменника $t_{ГВС} \approx 60...65$ °С необходимо автоматически поддерживать. Регулятор температуры воды на ГВС измеряет температуру $t_{ГВС}$ и управляет трехходовым (или проходным) клапаном на подаче воды от котельного контура к теплообменнику ГВС (см. рис. 4.17). Упрощенная структурная схема регулятора имеет вид, как на рис. 4.20.

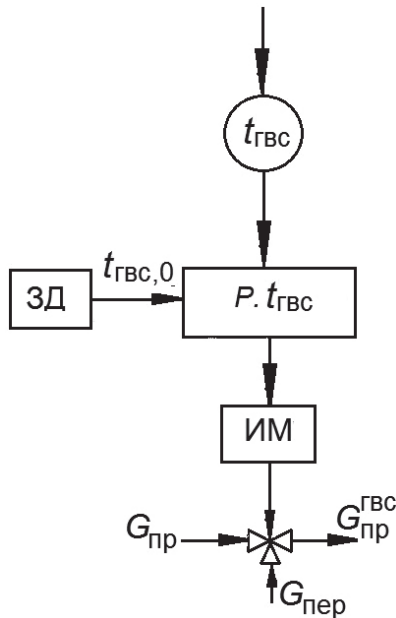


Рис. 4.20. Структурная схема регулятора температуры на ГВС

Регулятор, подмешивая необходимое количество обратной воды $G_{пер}$, понижает или повышает температуру воды в теплообменнике ГВС, тем самым осуществляя качественное регулирование $t_{ГВС}$. Теплообменники ГВС могут быть одноступенчатыми или двухступенчатыми.

В системах теплоснабжения малой мощности теплообменники отопления, ГВС или вентиляции обычно располагаются в помещении котельной, так как тепловые сети достаточно короткие. В системах теплоснабжения большой мощности распределение потоков горячей воды на отопление и горячее водоснабжение производится в центральных тепловых пунктах (ЦТП), которых может быть несколько, или индивидуальных тепловых пунктах (ИТП). В таком случае в ЦТП или

ИТП по магистральным трубопроводам подается прямая вода от котлов и возвращается обратная вода.

Схемы подсоединения теплообменников к тепловой сети могут быть такими же, что и рассмотренные выше.

4.4. Автоматизация центральных (ЦТП) и индивидуальных (ИТП) топливных пунктов

Автоматизация центральных и индивидуальных тепловых пунктов должна обеспечить:

- 1) регулирование подачи теплоты в системах отопления в зависимости от температуры наружного воздуха;
- 2) ограничение максимального расхода воды из тепловой сети на тепловой пункт путем перекрытия клапана регулятора теплоты на отопление;
- 3) поддержание требуемого перепада давлений в подающем и обратном трубопроводах тепловых сетей на вводе в ИТП;
- 4) поддержание заданной температуры воды, поступающей в систему горячего водоснабжения.

Для этих целей разработаны и выпускаются различные устройства, обеспечивающие регулирование, управление и информацию о работе оборудования ЦТП (ИТП).

На рис. 4.21 представлена принципиальная схема применения устройства РУНТ 312 (разработчик завод МЗТА) для автоматического управления теплоснабжением при независимой схеме присоединения системы отопления и двухступенчатой схеме горячего водоснабжения. Схема содержит все необходимые регуляторы, рассмотренные выше, но объединенные одним устройством управления.

Автоматический регулятор РУНТ 312 имеет сорок клеммных присоединений электрических проводов от различных датчиков и к различным электрическим приводам на регулирующих клапанах изменения расхода горячей воды. Потребление горячей сетевой воды из теплосети регулируется РУНТом путем воздействия на автоматический клапан на подающей линии теплосети к водо-водяному пластинчатому теплообменнику 1, в котором нагревается циркулирующая вода системы отопления здания.

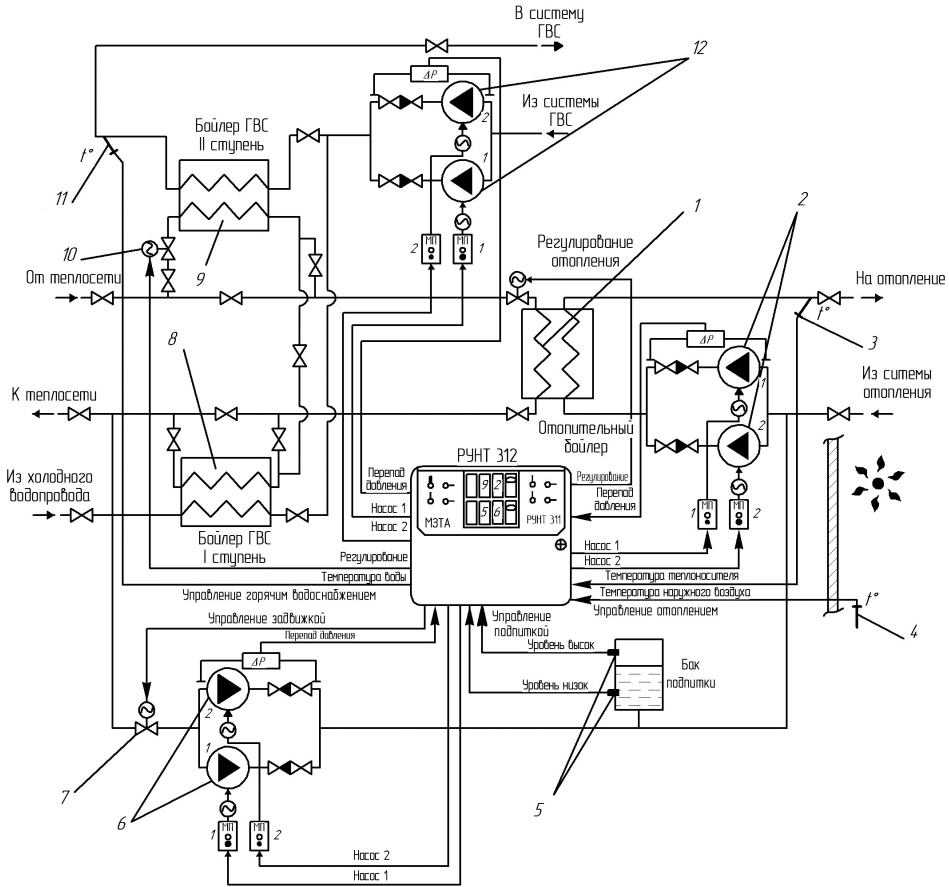


Рис. 4.21. Принципиальная схема применения автоматического регулятора РУНТ 312 в ЦТП для теплоснабжения систем отопления и горячего водоснабжения зданий:

1 — водо-водяной теплообменник для нагрева циркуляционной воды в системе отопления здания; 2 — два циркуляционных насоса (один запасной) с электронным управлением частоты вращения для системы отопления; 3 — датчик контроля начальной температуры воды в системе отопления; 4 — датчик контроля температуры наружного воздуха; 5 — датчик контроля уровня воды в системе отопления; 6 — два подпиточных насоса (один резервный) подачи воды из системы теплоснабжения для подпитки контура циркуляции системы отопления; 7 — автоматический запорный клапан на трубопроводе забора подпиточной воды из обратного трубопровода системы централизованного теплоснабжения; 8 — водо-водяной теплообменник первой ступени нагрева водопроводной воды на горячее водоснабжение здания; 9 — водо-водяной теплообменник второй ступени нагрева водопроводной воды на горячее водоснабжение здания; 10 — насосы (один резервный) циркуляции воды в системе горячее водоснабжение здания; 11 — автоматический вентиль на трубопроводе подачи горячей воды из подающего трубопровода сети теплоснабжения; 12 — датчик контроля температуры воды горячего водоснабжения на уровне 60 °С

Управление расходом теплоты системой отопления здания производится по сигналу датчика 4 температуры наружного воздуха t_n и датчика 3 контроля начальной температуры воды $t_{пр}^{потр}$, поступающей в систему отопления. С повышением t_n снижается $t_{пр}^{потр}$.

В отапливаемых помещениях здания используются отопительные приборы с терморегуляторами, изменяющими расход горячей воды через отопительный прибор в зависимости от настроенного значения температуры внутреннего воздуха t_v . При повышении t_v терморегулятор сокращает поступление в отопительный прибор горячей воды. Сокращение расхода приводит к повышению давления в подающих трубопроводах и увеличению перепада давления Δp на стороне нагнетания и всасывания циркуляционных насосов 2 системы отопления. Поддержание постоянства перепада давления при работе насосов два (один в резерве) энергетически рационально осуществлять путем применения насосов с электронным управлением частоты вращения вала электродвигателя, например, насосы фирмы UPE «Грундфосс».

С помощью датчиков 5 контролируется уровень воды в системе отопления. При падении статического давления в циркуляционной сети системы отопления, что вызывается снижением высоты водяного столба в стояках, датчики 5 передают через регулятор РУНТ 312 сигнал на пуск одного из подпиточных насосов 6 и открытие автоматического запорного клапана 7 на обратном трубопроводе теплосети.

В ЦТП здания устанавливаются два водо-водяных теплообменника 8 и 9 для двухступенчатого нагрева водопроводной воды на нужды горячего водоснабжения здания. В первой ступени 8 водопроводная вода нагревается теплотой обратной воды сети теплоснабжения. Если датчик 12 фиксирует, что на горячее водоснабжение поступает вода с температурой ниже $60\text{ }^\circ\text{C}$, то последует через регулятор РУНТ 312 команда на открытие автоматического вентиля 11 для поступления горячей воды из подающего трубопровода сети теплоснабжения в теплообменник 9 второй ступени нагрева воды горячего водоснабжения до $t_{ГВС} = 60\text{ }^\circ\text{C}$.

Циркуляция воды в системе горячего водоснабжения осуществляется от работы насосов 10 (один резервный). Расход воды в системе горячего водоснабжения значительно изменяется по часам суток. Наибольшие водоразборы характерны для утренних и вечерних часов. В ночные часы потребление горячей воды прекращается. Для сохранения $t_{ГВС} = 60\text{ }^\circ\text{C}$ круглые сутки насос 10 должен работать. Режим ра-

боты этого насоса значительно изменяется по времени суток, поэтому для поддержания постоянного перепада давления Δp и сокращения расхода электроэнергии рационально применить насос с электронным управлением частоты вращения.

Наибольшая тепловая нагрузка на систему отопления осуществляется в ночные часы суток холодного периода года, когда потребление горячей воды практически отсутствует, а в теплосети поддерживается температурный перепад 130/70 °С, при этом активно работает теплообменник *I*. Поэтому расчет теплотехнической эффективности теплообменника *I* должен проводиться на ночной режим работы ЦТП здания. Температуры, измеряемые термометрами сопротивления, и другие входные сигналы в РУНТ 312 показываются на цифросимвольных индикаторах. Этим обеспечивается вся необходимая персоналу информация о работе ЦТП. Обобщенный сигнал о нормальной работе ЦТП передается на диспетчерский пункт обслуживания группы зданий. Принципиально возможно подключение устройств РУНТ на нескольких ИТП или ЦТП к общей ЭВМ и к принтеру. МЗТА имеет соответствующие программы для ЭВМ с мнемосхемами одного или нескольких ИТП-ЦТП. Возможно непосредственное подключение к устройствам РУНТ принтеров для распечатки контролируемых параметров.

Необходимо отметить, что в обслуживаемых системой отопления от ЦТП помещениях в течение суток будут изменяться тепловые режимы. Так, на солнечных фасадах здания в помещениях будут повышаться теплопритоки от солнечной радиации, и требуется снижать расходы горячей воды через отопительные приборы. В то же время в помещениях на теневых фасадах здания нет поступления теплоты от солнечной радиации. В связи с этим необходимо у потребителя (в зданиях) централизованное теплоснабжение от ЦТП (или ИТП) дополнять местными средствами автоматизации (например, осуществить пофасадное регулирование), которые улучшат комфортные условия в помещениях, уменьшая перегрев одних и перегрев других помещений, тем самым позволяя полнее использовать теплоту отопления. Наиболее полно используется теплота на отопление при установке индивидуальных регуляторов на отопительные приборы, которые в настоящее время разработаны под названием «терморегуляторы».

ГЛАВА 5. Регулирование воздуходувных станций с центробежными компрессорами

Воздуходувные станции могут быть оснащены поршневыми компрессорами, центробежными компрессорами или их комбинацией.

Наибольшее распространение получили воздуходувные станции с центробежными компрессорами, подающими воздух в воздуховод, из которого он распределяется по потребителям. Упрощенная технологическая схема станции с разводкой воздуха по потребителям представлена на рис. 5.1.

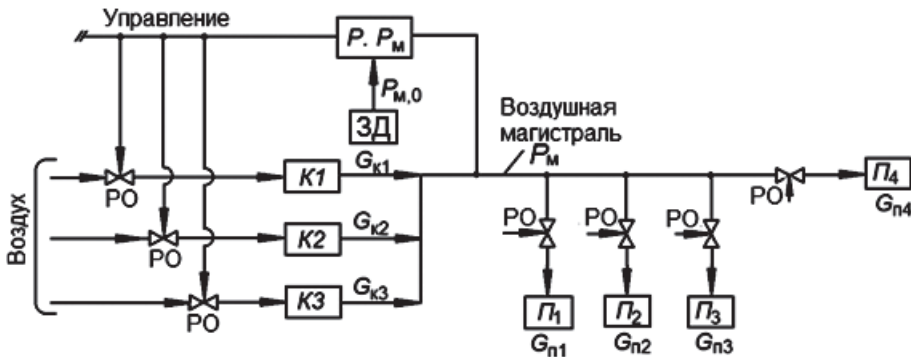


Рис. 5.1. Технологическая схема воздуходувной станции:
 К1, К2, К3 — центробежные компрессоры; П1–П4 — потребители воздуха;
 p_m — давление воздуха в магистрали

В статическом режиме работы станции сумма расходов воздуха от компрессоров $\sum_{i=1}^3 G_{ki}$ должна быть равна сумме расходов воздуха

к потребителям $\sum_{i=1}^4 G_{\pi i} \left(\sum_{i=1}^3 G_{ki} = \sum_{i=1}^4 G_{\pi i} \right)$. В этом режиме давление возду-

ха в магистрали p_m не изменяется и должно быть равно заданному значению $p_{m,0}$. В динамическом режиме, наступающем при изменении расходов воздуха некоторыми потребителями, давление в магистрали p_m будет изменяться, и его необходимо регулировать. С этой целью на выходе воздуха в магистраль устанавливают регулятор давления воздуха в магистрали ($P.p_m$), который должен управлять работой центробежных компрессоров $K1$, $K2$ и $K3$ (каскадная схема управления). Управление зависит от того, каким приводом оснащены центробежные компрессорные машины (ЦКМ): они могут иметь привод от электродвигателя с постоянным числом оборотов, двигателями с переменным числом оборотов или привод от паровой турбины.

Рассмотрим регулирование ЦКМ с приводом от электродвигателя с постоянным числом оборотов. Каждый компрессор воздухоудной станции должен быть оснащен регулятором производительности (регулятором расхода воздуха), который должен обеспечивать постоянный расход воздуха на нагнетании в статическом режиме работы. В соответствии со статической характеристикой компрессора с постоянным числом оборотов двигателя этот расход однозначно определяется по давлению воздуха на нагнетании p_n , поэтому регулятор расхода строится по давлению воздуха p_n . Регулятор давления p_n должен управлять изменением расхода воздуха на всасе компрессора как более экономичным способом регулирования по сравнению с дросселированием воздуха на нагнетании.

На рис. 5.2 представлена упрощенная технологическая схема ЦКМ с подачей сжатого воздуха в общую магистраль.

Регулятор производительности ($P.p_n$) поддерживает заданное давление воздуха на нагнетании $p_{n,0}$ путем изменения расхода воздуха G_{k1} перемещением регулирующей заслонки, установленной во всасывающем воздухопроводе. В динамических режимах работы компрессоров при изменениях расходов воздуха у потребителей давления в общей воздушной магистрали p_m будет изменяться, а его необходимо восстанавливать до заданного значения $p_{m,0}$. С этой целью на станции устанавливается регулятор давления воздуха в магистрали ($P.p_m$), который при отклонении давления от заданного ($\pm \Delta p_m = p_m - p_{m,0}$) вырабатывает корректирующий импульс для регуляторов производитель-

ности компрессоров. В соответствии с этим импульсом изменяется задание регуляторам производительности компрессоров K_1, K_2, K_3 , которые, изменяя расходы воздуха G_{K1}, G_{K2}, G_{K3} соответствующим образом (увеличивая или уменьшая), восстанавливают давление p в общей магистрали. Поскольку регулятор $P.p_m$ — один на несколько компрессоров, то он является главным корректирующим регулятором, осуществляющим каскадное управление работой регуляторов расхода компрессоров.

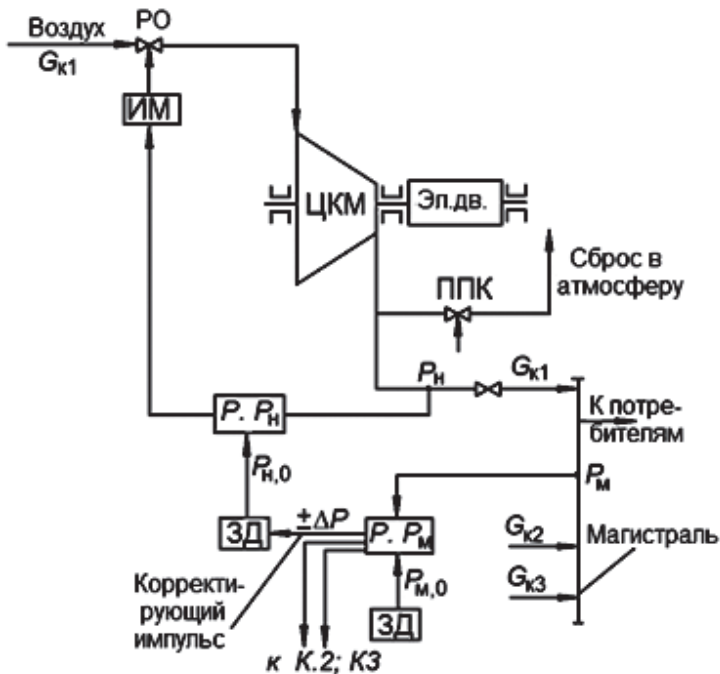


Рис. 5.2. Технологическая схема ЦКМ с регулятором производительности и главным корректирующим регулятором (ППК — противопомпажный клапан)

При резких сбросах нагрузки (резкое уменьшение расхода воздуха к потребителям) центробежный компрессор работает в режиме помпажа, который сопровождается колебаниями давления на нагнетании компрессора, а также вибрацией. Вибрация через какое-то время нарушает соосность компрессора с электроприводом и ослабляет соединение установок с фундаментом, что приводит к аварии компрессорной установки. При вводе компрессора в режим помпажа необходимо вы-

вести его из этого режима работы, что достигается увеличением расхода воздуха через компрессор с помощью сброса части его в атмосферу.

Качественно работу компрессора в режиме помпажа можно рассмотреть по его статической характеристике (рис. 5.3).

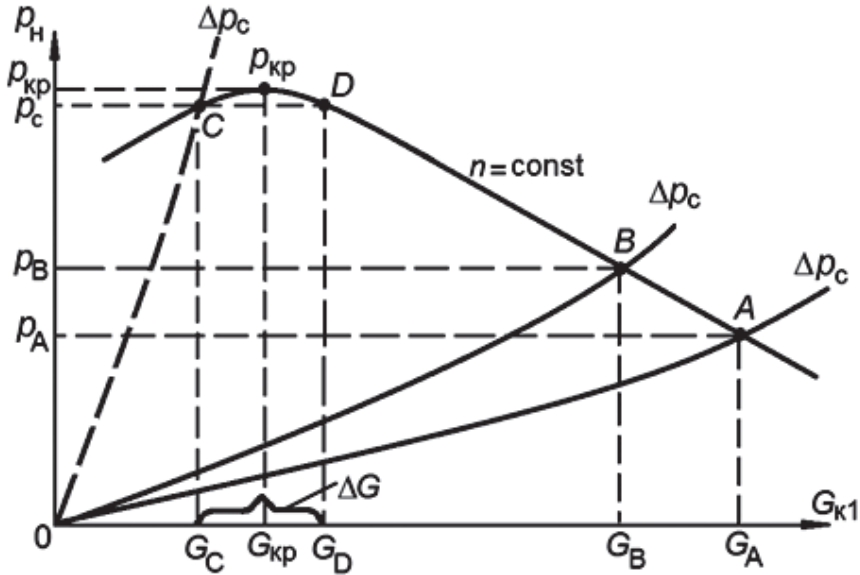


Рис. 5.3. Статическая характеристика компрессора:

p_H — давление нагнетания; $G_{к1}$ — расходы воздуха через компрессор;
 Δp_c — сопротивление воздушной сети; A, B — рабочие точки компрессора;
 ΔG — расход воздуха, сбрасываемого в атмосферу

При нормальной работе компрессора давление нагнетания совпадает с сопротивлением сети (точка A — компрессор выдает воздух с давлением p_A и расходом G_A). При уменьшении расхода воздуха у потребителя, сопротивление сети увеличивается и давление на нагнетании компрессора также увеличивается (точка B — компрессор выдает воздух с давлением p_B и расходом G_B). При сильном уменьшении расхода воздуха у потребителя до значения G_C , давление на нагнетании, проходя критическое $p_{кр}$, установится на значении p_c , меньшем критического. Возникает режим помпажа, поскольку часть неиспользованного воздуха с давлением $p_{кр}$ будет возвращаться в компрессоре с выхода на вход, создавая пульсацию давления (и создавая вибрацию).

Таким образом, зона помпажа на характеристике ограничена давлением $p_{кр}$ с расходом $G_{кр}$. Справа от этой линии давления — рабочая

зона установки, а слева — зона помпажа. Для вывода машин из помпажа необходимо часть расхода воздуха ΔG сбросить в атмосферу, что переводит работу компрессора в режим нормальной работы (точка D с расходом воздуха через машину G_D).

Для защиты компрессора от помпажа устанавливают противопомпажный регулятор ППР, который измеряет (для надежности) два параметра — расход воздуха и давление на нагнетании. При достижении хотя бы одним параметром критических значений, регулятор открывает противопомпажный клапан ППК и часть воздуха сбрасывается в атмосферу. На рис. 5.4 показана упрощенная схема противопомпажного регулятора.

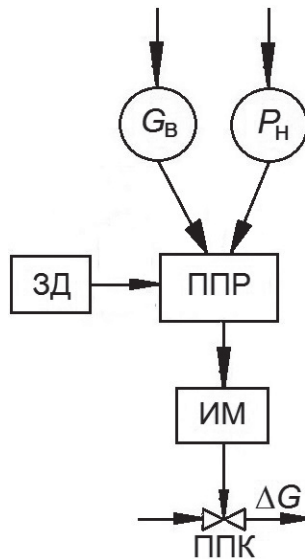


Рис. 5.4. Структурная схема противопомпажного регулятора

При увеличении расхода воздуха выше $G_{кр}$ противопомпажный клапан отключается.

Если рассматривать процесс регулирования ЦКМ с приводом, изменяющим число оборотов, воздуходувные станции оснащены компрессорами, имеющими электродвигатели с переменным числом оборотов (частотное управление) или имеющими в качестве привода паровую турбину (на паровоздуходушных станциях мощных металлургических комбинатов).

На рис. 5.5 представлены упрощенные технологические схемы ЦКМ с приводами от электродвигателя и от паровой турбины.

Регулятор производительности ($P.p_n$), получая импульс по давлению на нагнетании p_n и корректирующий импульс от регулятора давления в магистрали ($P.p_m$), управляет через частотный преобразователь числом оборотов электродвигателя (рис. 5.5, а), восстанавливая давление в магистрали p_m .

При работе ЦКМ от паровой турбины регулятор производительности ($P.p_n$) будет управлять подачей пара на паровую турбину (ПТ), также изменяя число оборотов турбины (рис. 5.5, б — пунктирная линия).

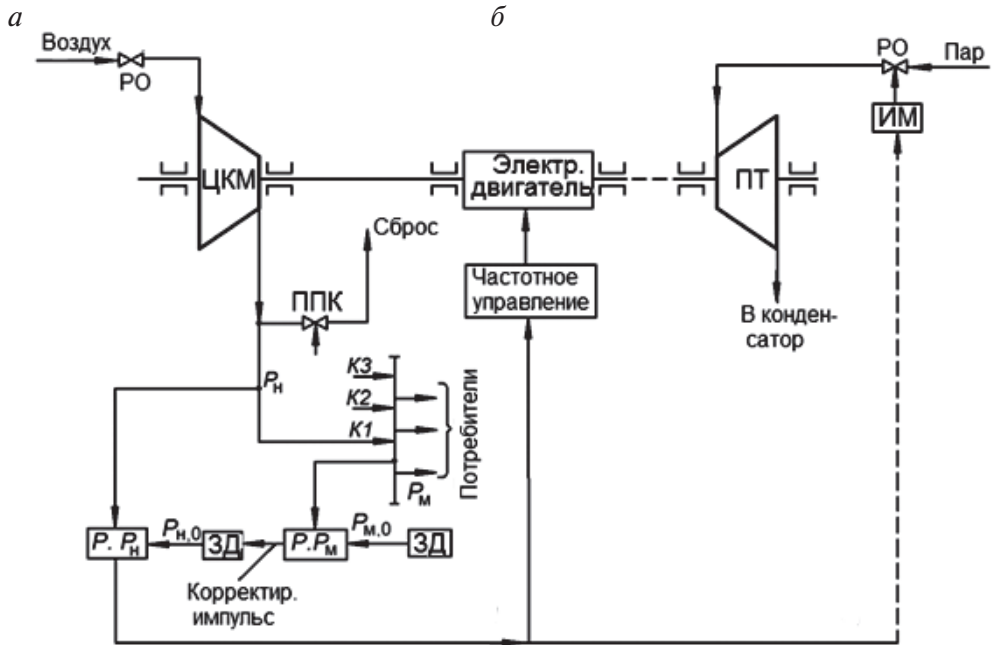


Рис. 5.5. Технологическая схема ЦКМ с приводами от электродвигателя (а) и паровой турбины (б)

Рассмотрим работу ЦКМ по статической характеристике компрессора (рис. 5.6).

При регулировании нагрузки путем изменения числа оборотов двигателя (наиболее экономичный метод) критические значения расходов воздуха $G_{кр}$ и критические давления $p_{кр}$ уменьшаются и смещаются влево при уменьшении числа оборотов двигателя n . Регулятор поддерживает давление на выходе ЦКМ, равное заданному давлению воздуха в магистрали $p_{m,0}$ при уменьшении расходов воздуха у потребителей ($p_A = p_B = p_C$) (рис. 5.6). При этом практически не дости-

гается зона помпажа. Противопомпажный регулятор (ППР) служит как защита от помпажа только в случаях неожиданных резких сбросов нагрузки, когда регулятор $P.p_n$, в силу инерционности изменения числа оборотов, не успевает среагировать на эти изменения расходов воздуха.

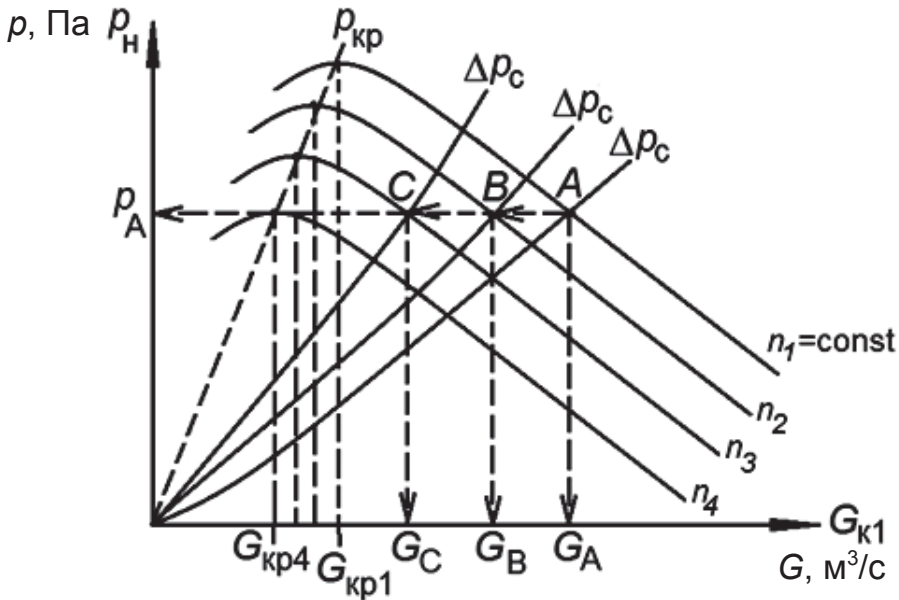


Рис. 5.6. Статическая характеристика работы ЦКМ при переменном числе оборотов привода ($G_{к1}$ — расход воздуха компрессора К1)

На турбокомпрессорах, сжимающих кислород, для регулирования производительности применяют байпасирование (перепуск части неостребованного потребителем кислорода с нагнетания компрессора на его всас). В этом случае на компрессоре устанавливают или регулятор давления на нагнетании, или регулятор расхода, которые управляют клапаном, установленным на байпасной линии.

Автоматический контроль параметров сводится к измерению требуемых по технологии необходимых параметров по потокам (воздух, охлаждающая вода и система смазки). Например, для воздушного компрессора необходимо контролировать температуру воздуха на выходе, за охладителями воздуха, температуру и давление масла, подаваемого в систему смазки, давление подаваемой на охлаждение воды, наличие потока воды в системе охлаждения (реле протока), температуру под-

шипников, температуру обмоток электродвигателя и т. п. По выходе параметров за допустимые пределы должна срабатывать аварийная защита компрессора, отключающая привод.

Контроль параметров и необходимые защиты регламентируются назначением компрессора, его конструктивными особенностями, природой сжимаемых газов и т. п. Необходимые сведения по ним можно получить из интернета для конкретного типа используемого оборудования.

ГЛАВА 6. Построение функциональных схем автоматизации технологических процессов

При разработке проектов автоматизации теплоэнергетических установок решаются вопросы объема оснащения технологического оборудования средствами регулирования, управления и контрольно-измерительными приборами, выбора схем автоматического регулирования, сигнализации и защиты.

Выбор количества параметров, подлежащих регулированию, объема информации о ходе процесса и состоянии агрегата диктуется технологической необходимостью. Контролю подлежат лишь те величины, которые подвержены изменению по ходу процесса и управляемы.

Для выполнения технического проекта автоматизации необходимо знать:

- 1) состав проектируемого объекта, работу и основные характеристики технологических установок и агрегатов;
- 2) требования к структуре управления объектом, пункты управления (центральные щиты управления, диспетчерские щиты управления, агрегатные щиты управления и др.), их расположение и взаимосвязь;
- 3) перечень контролируемых и регулируемых величин, характеристики измеряемых сред (агрессивная или нет, давление, температура и т. д.), требуемую точность контроля и регулирования (допустимые пределы отклонения регулируемой величины), функциональные признаки приборов (показание, регистрация, сигнализация, суммирование и т. д.);

- 4) перечень дистанционно управляемого силового оборудования и электроприводов;
- 5) необходимый минимум защит и сигнализации при работе объекта.

Функциональная схема 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). Функциональная схема должна учитывать:

- 1) состав и содержание задач по контролю и управлению технологическими процессами;
- 2) взаимосвязь между местными системами управления отдельными объектами и центральной системой управления, если она определена структурой управления.

На функциональной схеме показывают:

- 1) упрощенную технологическую схему агрегатов, подлежащих автоматизации, с указанием всех потоков, регулирующих органов и того оборудования, которое необходимо для понимания работы агрегата;
- 2) приборы и средства автоматизации и управления, изображаемые условными обозначениями, которые приняты по ГОСТ 21.404–85, а также линии связи между ними;
- 3) агрегатированные комплексы, машины централизованного контроля, управляющие вычислительные машины, микропроцессорные средства управления и линии связи их с датчиками, преобразователями, исполнительными механизмами и т. п.

Функциональные схемы являются основанием для составления заказных спецификаций на приборы и средства автоматизации, схемы кабельных и трубных проводок, схемы электропитания щитов КИПиА и т. п.

Основные правила составления функциональных схем автоматизации. Прежде чем составлять функциональную схему автоматизации того или иного агрегата (установки), необходимо уяснить технологические процессы, протекающие в нем, определиться с необходимыми уровнями автоматизации (контроль параметров, необходимые защиты и сигнализация, автоматическое регулирование параметров и т. п.), со структурой автоматизации (приборы местные, щит агрегата, пульт управления, ма-

шины централизованного контроля и управления и т. п.). Только после этого приступить к составлению функциональных схем.

Порядок составления схем следующий:

- 1) в верхней части листа изображают упрощенную технологическую схему оборудования;
- 2) в нижней части листа по всей длине формата рисуют прямоугольники, число которых отражает принятую структуру средств автоматизации;
- 3) в прямоугольниках располагают условные изображения приборов контроля и средств автоматизации согласно принятой структуре;
- 4) составляют функциональную схему автоматизации, пользуясь следующими правилами — комплекты измерительных и регулирующих приборов начинают рисовать слева направо и сверху вниз, т. е. на технологической схеме у трубопроводов и оборудования размещают условные изображения первичных преобразователей; промежуточные преобразователи (датчики) размещают в первом (верхнем) прямоугольнике (приборы местные), вторичные измерительные приборы размещают во втором (сверху) прямоугольнике (щит агрегата) и т. д.;
- 5) все приборы, входящие в измерительный или регулирующий комплект, соединяют линиями связи. Если приборов много и получается много пересекающихся линий связи, затеняющих схему, допускается разрыв линий связи. Разрыв производится при подводе линий связи к приборам, расположенным в первом прямоугольнике (приборы местные), и нумеруется арабскими цифрами (1, 2, 3, ...) слева направо (см. примеры построения схем, приведенные в приложении);
- 6) после составления функциональной схемы автоматизации все измерительные и регулирующие (управляющие) комплекты и все приборы, входящие в комплект, нумеруются слева направо. Нумерация приборов своя у каждой организации, выполняющей проект автоматизации;
- 7) после составления функциональной схемы и нумерации приборов составляют заказную спецификацию на приборы и средства автоматизации.

На технологических трубопроводах показывают только те вентили, задвижки, заслонки, клапаны и другие устройства, которые уча-

ствуют в системе контроля и управления процессами или необходимы для определения относительного расположения отборных устройств и первичных измерительных преобразователей.

Изображение приборов и средств автоматизации. На функциональной схеме изображаются все приборы, средства автоматизации и управления, необходимые для оснащения проектируемого объекта.

К приборам и средствам автоматизации относится группа устройств, с помощью которых осуществляется измерение, регулирование, управление и сигнализация технологических процессов различных производств. Приборы и средства автоматизации подразделяют на измерительные и преобразующие приборы, исполнительные механизмы и регулирующие органы. Для понимания и прочтения условных обозначений всех этих устройств необходимо знать их принцип действия и назначение.

Измерительное устройство (комплект измерения какого-либо параметра) в общем случае состоит из первичного, промежуточного преобразователя и измерительного прибора (вторичный измерительный или регулирующий прибор).

Первичный измерительный преобразователь — это элемент измерительного устройства, к которому подведена измеряемая величина (параметр). Он занимает первое место в измерительной цепи (канале измерения). Примерами первичных преобразователей могут служить: сужающее устройство для измерения расхода среды (диафрагма), уравнильный сосуд для измерения уровня жидкости, термоэлектрические преобразователи (термопары, термометры сопротивления) и т. д.

Промежуточный преобразователь (датчик) — это элемент измерительного устройства, состоящий из чувствительного элемента и преобразователя сигнала от чувствительного элемента в сигналы различного вида (электрические, пневматические) для дистанционной передачи показаний на вторичные приборы (измерительные или регулирующие). Примером такого преобразователя могут служить манометры (чувствительный элемент — одновитковая трубчатая пружина, преобразователь дифференциально-трансформаторный), дифманометры (чувствительный элемент — мембранный блок, преобразователь дифференциально-трансформаторный), передающие сигналы на вторичные измерительные и регулирующие приборы.

Измерительным прибором называют средство измерения, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, доступной для непосредственного восприятия персоналом (вторичные измерительные приборы) или для преобразования поступившего сигнала в целях регулирования (регулирующие приборы), защиты и сигнализации.

Вторичные измерительные приборы могут иметь различные функциональные отличия (признаки). Они могут быть показывающими (имеют шкалу и стрелку), регистрирующими (запись на дисковую или ленточную диаграмму), интегрирующими (имеют встроенный счетчик количества протекающей среды), сигнализирующими (имеют встроенные контакты, срабатывающие при достижении измеряемого параметра максимального и минимального значений), регулирующими (используемые при создании систем регулирования различных параметров).

Условные обозначения приборов и преобразующих устройств состоят из основного условного изображения прибора или устройства, куда вписываются буквенные обозначения контролируемых и регулируемых величин, а также функциональных признаков прибора.

Регулирующие органы по конструкции представляют собой устройства, монтируемые непосредственно в технологические линии: различные клапаны, заслонки, шиберы, направляющие аппараты и т. п. В ГОСТ 21.404–85 они обозначаются одним условным изображением.

Исполнительные механизмы предназначены для управления регулирующими органами и представляют собой относительно сложные многоэлементные устройства (двигатель, редуктор, конечные выключатели, датчики перемещения и т. п.). Они отличаются друг от друга принципом действия, техническими и эксплуатационными характеристиками и т. п. По роду используемой энергии используемые механизмы подразделяются на гидравлические, электрические и комбинированные. Несмотря на это, они в ГОСТе обозначаются одними условными изображениями.

В основу условных обозначений по ГОСТ 21.404–85 положены простые условные изображения приборов и буквенные обозначения параметров и функциональных признаков приборов (табл. 1, 2).

Таблица 1

Графические условные изображения приборов и средств автоматизации

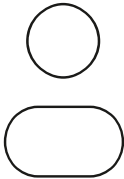
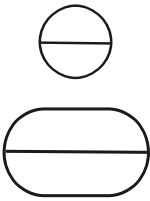




Приборы	Условное изображение
<p>Первичный измерительный преобразователь (датчик): прибор, устанавливаемый по месту (вне щита) на технологическом трубопроводе, аппарате, стене, колонне, стенде датчиков:</p> <p>базовое обозначение</p> <p>допускаемое обозначение</p>	
<p>Прибор, установленный на щите, пульте управления:</p> <p>базовое обозначение</p> <p>допускаемое обозначение</p>	
<p>Исполнительный механизм (любой)</p>	
<p>Регулирующий орган (любой)</p>	
<p>Линии связи</p>	
<p>Пересечение линий связи без соединения друг с другом</p>	
<p>Пересечение линий связи с соединением друг с другом</p>	

Таблица 2

**Графические условные изображения электрических устройств,
применяемых в функциональных схемах**

Наименование	Условное изображение
Звонок электрический	
Сирена электрическая (пневматическая)	
Гудок электрический	
Лампа сигнальная (табло)	
Электродвигатель	

Для получения полного обозначения прибора или средства автоматизации в его графическое условное изображение в виде круга (или овала), в верхнюю часть вписывают буквенные условные обозначения, которые определяют измеряемый параметр и функциональные признаки (характеристики) прибора.

Для обозначения измеряемого параметра и функциональных признаков прибора приняты печатные прописные буквы латинского алфавита.

Основные буквенные условные обозначения измеряемых величин

Буквы	Основное значение первой буквы
<i>D</i>	Плотность
<i>E</i>	Любая электрическая величина
<i>F</i>	Расход
<i>G</i>	Размер, положение, перемещение
<i>H</i>	Ручное воздействие
<i>K</i>	Время, временная программа
<i>L</i>	Уровень
<i>M</i>	Влажность
<i>P</i>	Давление, вакуум, разрежение
<i>Q</i>	Величина, характеризующая качество: состав, концентрацию и т. д.
<i>R</i>	Радиоактивность
<i>S</i>	Скорость, частота
<i>T</i>	Температура
<i>U</i>	Несколько разнородных измеряемых величин
<i>V</i>	Вязкость
<i>W</i>	Масса

Если функциональных признаков приборов много (много букв), то допускается условное изображение прибора в виде овала. При выполнении функциональных схем допускается увеличивать условное изображение приборов (круг или овал) в 1,5–2 раза в целях более четкого буквенного обозначения признаков приборов.

Для обозначения функций, выполняемых прибором, служат семь букв: *A, I, K, C, S, H, L*, — при этом *H* и *L* записываются вне изображения прибора (круга или овала). Эти буквы не первые, так как первые буквы всегда обозначают измеряемый параметр или ручное воздействие.

Буквенные условные обозначения функций, выполняемых прибором

Буквы	Отображение информации	Буквы	Отображение информации
<i>A</i>	Сигнализация	<i>S</i>	Включение, отключение, переключение
<i>I</i>	Показание	<i>H*</i>	Верхний предел измеряемой величины
<i>R</i>	Регистрация	<i>L*</i>	Нижний предел измеряемой величины
<i>C</i>	Регулирование		

Для обозначения формирования выходного сигнала предусмотрено шесть резервных букв: *E, K, O, T, Y, Z*, — которыми обозначают дополнительные функциональные признаки приборов-преобразователей. В основном используются четыре буквы.

Дополнительные буквенные обозначения функциональных признаков приборов

Буквы	Функциональный признак
<i>E</i>	Чувствительный элемент (первичное преобразование)
<i>T</i>	Дистанционная передача сигнала (промежуточное преобразование)
<i>K</i>	Станция управления
<i>Y</i>	Преобразование, вычислительные функции

Буква *E* применяется для обозначения чувствительных элементов, т. е. устройств, выполняющих первичное преобразование. Примером могут служить сужающие устройства (диафрагмы) для измерения расходов, термометры сопротивления или термопары для измерения температуры, уравнительные сосуды для измерения уровня жидкостей и т. п.

Буква **T** обозначает промежуточное преобразование с дистанционной передачей показаний на вторичный измерительный или регулирующий прибор. Ее применяют для обозначения приборов (датчиков): бесшкальных манометров, дифманометров, нормирующих преобразователей и т. п.

Буква **K** обозначает станции управления, входящие в состав приборов. Примером могут служить блоки управления в системах регулирования.

Буква **Y** используется для обозначения преобразователей сигналов и вычислительных устройств.

Буквы **O**, **Z** — резервные буквы, которые можно использовать при обозначении функций, не входящих в вышеперечисленные. Например, буквой **Z** можно обозначать преобразователи, выдающие дискретные (цифровые) сигналы на выходе преобразователя. В таком случае на схеме при использовании резервных букв даются пояснения того, что они обозначают.

Для уточнения измерительного параметра предусмотрено четыре дополнительных буквенных обозначения: **D**, **F**, **J**, **Q**; причем три из них — **D**, **F**, **Q** — разрешается записывать строчными буквами: **d**, **f**, **q**.

**Дополнительные буквенные обозначения,
уточняющие измеряемый параметр**

Буквы	Дополнительное значение первой буквы
D(d)	Разность, перепад
F(f)	Соотношение, доля, дробь
J	Автоматическое переключение, обегание
Q(q)	Интегрирование, суммирование по времени

Буквы **B**, **N** — резервные буквы, которые служат для обозначения приборов, не измеряющих какой-либо параметр, либо для обозначения измеряемого параметра без буквенного обозначения. Примерами таких приборов служат магнитные пускатели систем управления исполнительными механизмами, для обозначения которых используют букву **N**, и датчики контроля факела в системах защит, для обозначения которых используется буква **B**.

Буква **X** не рекомендуется к применению, а если она используется при составлении схем, то та информация, которая ей предписана, должна быть оговорена на поле функциональной схемы.

ГОСТ 21.404–85 не допускает применения одной и той же резервной буквы в одной и той же функциональной схеме (документации) для обозначения разных величин, понятий и т. п.

Для определения характеристик работы приборов и средств автоматизации (преобразователей) применяют дополнительные буквенные обозначения и математические символы, и их записывают вне контура изображения приборов (круга или овала).

Дополнительные буквенные обозначения характеристик работы прибора

Обозначение	Характеристика
Энергия сигнала	
<i>E</i>	Электрическая
<i>P</i>	Пневматическая
<i>G</i>	Гидравлическая
Вид формы сигнала	
<i>A</i>	Аналоговая
<i>D</i>	Дискретная
Операции, выполняемые вычислительным устройством:	
Σ	Суммирование
<i>k</i>	Умножение сигнала на постоянный коэффициент <i>k</i>
\times	Перемножение двух и более сигналов друг на друга
:	Деление сигналов друг на друга
f^n	Возведение величины сигнала в степень
$\sqrt[n]{f}$	Извлечение из величины сигнала корня степени <i>n</i>
lg	Логарифмирование
dx/dt	Дифференцирование
\int	Интегрирование
<i>X(-1)</i>	Изменение знака сигнала
max	Ограничение верхнего значения сигнала
min	Ограничение нижнего значения сигнала

Рекомендации по применению и методике построения функциональных схем по ГОСТ 21.404–85. Условные обозначения приборов и средств автоматизации состоят из графических и буквенных обозначений. Гра-

фические условные обозначения приведены в табл. 1 и 2. Размеры графических обозначений можно увеличивать.

Основные буквенные обозначения приведены на с. 164–166, а для преобразователей сигналов — на с. 167.

Отборное устройство для всех постоянно подключенных приборов не имеет специального обозначения, а изображается в виде тонкой сплошной линии, соединяющей технологическое оборудование с условным обозначением первичного измерительного преобразователя или прибора.

В случаях, когда необходимо указать точное место расположения отборного устройства или точки измерения (внутри контура технологического оборудования), рекомендуется в конце тонкой линии изображать окружность диаметром 2 мм, как показано на рис. П8.

Методика построения условного обозначения прибора следующая:

- 1) в верхней части графического изображения прибора (круга или овала) записывают буквенные обозначения измеряемой величины и функциональных признаков прибора;
- 2) в нижней части изображения прибора записывают позиционное обозначение (позиции) приборов в функциональной схеме.

Расположение буквенных обозначений должно быть слева направо в следующем порядке:

- 1) обозначение основной измеряемой величины;
- 2) обозначение, уточняющее (если это необходимо) основную измеряемую величину;
- 3) обозначение функциональных признаков приборов.

Если прибор может выполнять несколько функций, то порядок расположения буквенных обозначений функциональных признаков должен быть следующим: *I* — показание; *R* — регистрация; *C* — регулирование (управление); *S* — включение, отключение, блокировка; *A* — сигнализация (табл. 3).

Пример построения условного обозначения прибора показан на рис. 6.1.

Порядок построения условных обозначений преобразователей сигналов с применением дополнительных букв принимают следующий: основное обозначение измеряемой величины — одна из дополнительных букв: *E*, *T*, *K* или *Y*.

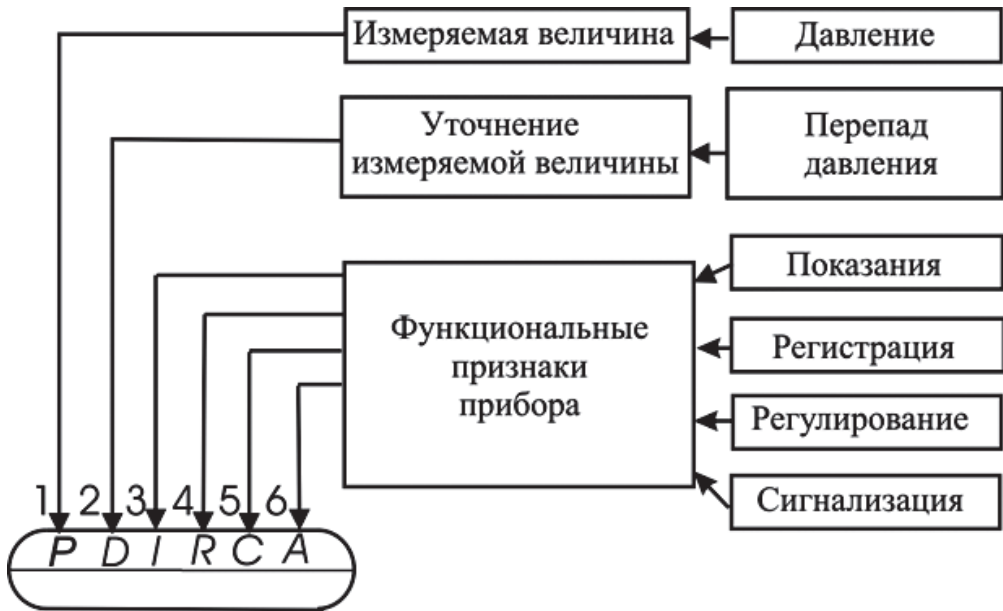

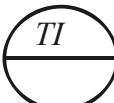


Рис. 6.1. Схема построения условного обозначения прибора

При построении условных обозначений преобразователей сигналов и вычислительных устройств обозначения, определяющие вид преобразования или операции, осуществляемые вычислительным устройством (см. с. 166), наносят справа от графического обозначения прибора.

Примеры построения условных обозначений приборов и средств автоматизации приведены в табл. 3.

Таблица 3

Обозначение	Назначение и функциональные признаки приборов	Приборы
	Первичный измерительный прибор (чувствительный элемент) для измерения температуры, установленный по месту	Термопары, термометр сопротивления, термобаллон манометрического термометра и т. п.
	Прибор для измерения температуры показывающий, установленный по месту	Термометр ртутный, спиртовый, манометрический и т. п.

Продолжение табл. 3

Обозначение	Назначение и функциональные признаки приборов	Приборы
	<p>Прибор для измерения температуры показывающий, установленный на щите</p>	<p>Милливольтметр, логометр, потенциометр, мост автоматический и т. п.</p>
 	<p>Приборы для измерения температуры однокотечные, регистрирующие, установленные на щите</p>	<p>Самопишущий милливольтметр, потенциометр, мост автоматический и т. п.</p>
	<p>Прибор для измерения температуры с автоматическим обегачным устройством регистрирующий, установленный на щите</p>	<p>Многоотечный самопишущий потенциометр, мост автоматический и т. п.</p>
	<p>Прибор для измерения перепада давления показывающий, установленный по месту</p>	<p>Дифманометр показывающий и т. п.</p>
	<p>Прибор для измерения давления (разрежения) показывающий, установленный по месту</p>	<p>Любой показывающий манометр, напоромер, тягомер и т. п.</p>
	<p>Прибор для измерения давления (разрежения) показывающий, установленный на щите</p>	<p>Манометр, напоромер, тягомер и т. д.</p>
 	<p>Приборы для измерения давления (разрежения) показывающие и регистрирующие, установленные на щите</p>	<p>Самопишущий манометр или любой вторичный прибор для регистрации давления</p>

Продолжение табл. 3

Обозначение	Назначение и функциональные признаки приборов	Приборы
	Первичный измерительный преобразователь расхода, установленный по месту	Диафрагма, сопло, труба Вентури, датчик индукционного расходомера и т. д.
	Прибор для измерения расхода показывающий, установленный по месту	Дифманометр (рота-метр) показывающий
 	Прибор для измерения расхода показывающий и регистрирующий, установленный на щите	Вторичный измерительный прибор для регистрации расхода
	Прибор для измерения расхода показывающий, установленный на щите	Вторичный измерительный прибор с интегратором, показывающий
	Прибор для измерения соотношения расходов показывающий и регистрирующий, установленный на щите	Вторичный измерительный прибор для измерения соотношения расходов
	Первичный измерительный прибор (чувствительный элемент) для измерения уровня, установленный по месту	Уравнительный сосуд, датчик электрического или емкостного уровня
 	Прибор для измерения уровня показывающий и регистрирующий, установленный на щите	Вторичный измерительный прибор, показывающий и регистрирующий

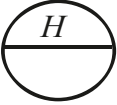
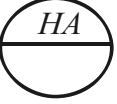
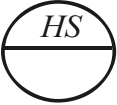


Продолжение табл. 3

Обозначение	Назначение и функциональные признаки приборов	Приборы
	<p>Прибор для измерения уровня показывающий с сигнальным устройством по верхнему и нижнему пределам, установленный на щите</p>	<p>Вторичный измерительный прибор, показывающий с сигнальным устройством</p>
	<p>Первичный измерительный прибор (чувствительный элемент) для измерения качества, установленный по месту</p>	<p>Датчик (отборное устройство) кислородомера</p>
	<p>Прибор для измерения качества показывающий, установленный на щите</p>	<p>Газоанализатор, показывающий содержание кислорода в дымовых газах</p>
	<p>Прибор для измерения температуры бесшкальный с контактным устройством, установленный по месту</p>	<p>Температурное реле</p>
	<p>Прибор для измерения температуры показывающий с сигнальным устройством, установленный по месту</p>	<p>Манометрический термометр с сигнализацией по верхнему пределу</p>
	<p>Прибор для измерения давления с сигнальным устройством, установленный по месту</p>	<p>Реле давления</p>
	<p>Прибор для измерения давления показывающий с сигнальным устройством, установленный по месту</p>	<p>Электроконтактный манометр и т. п.</p>
	<p>Прибор для измерения давления показывающий с сигнальным устройством, установленный на щите</p>	<p>Вторичный измерительный прибор показывающий с сигнализацией по нижнему уровню</p>

Продолжение табл. 3

Обозначение	Назначение и функциональные признаки приборов	Приборы
	Преобразователь сигнала давления, установленный на щите. Входной сигнал пневматический, выходной — электрический	Преобразователь измерительный давления в электрический сигнал
	Преобразователь сигнала давления в скорость изменения давления, установленный на щите	Дифференциатор давления
	Преобразователь температуры, установленный на щите. Входной и выходной сигналы электрические	Нормирующие преобразователи сигналов от термопар и термометров сопротивления в унифицированный сигнал постоянного тока
	Прибор для контроля погасания факела бесшкальный с контактным устройством, установленный на щите	Вторичный прибор запально-защитного устройства
	Регулятор давления бесшкальный, установленный на щите	Любой регулирующий прибор по давлению
	Регулятор температуры, установленный на щите	Любой регулятор температуры
	Комплект для регулирования температуры, состоящий из измерительного блока и усилителя	Любой регулирующий прибор по температуре, состоящий из двух блоков: измерительного и усиливающего

Окончание табл. 3

Обозначение	Назначение и функциональные признаки приборов	Приборы
	<p>Аппаратура, предназначенная для ручного дистанционного управления (включение, выключение двигателя, открытие, закрытие запорного органа, изменение задания регулятору), установленная на щите</p>	<p>Кнопка, ключ управления, датчик</p>
	<p>Аппаратура, предназначенная для ручного дистанционного управления, снабженная сигнальными устройствами, установленная на щите</p>	<p>Кнопка со встроенной лампочкой, ключ управления с подсветкой и т. п.</p>
	<p>Ключ управления, предназначенный для выбора управления, установленный на щите</p>	<p>Переключатели управления</p>
	<p>Пусковая аппаратура для управления электродвигателем (включение, выключение насоса; открытие, закрытие регулирующего органа исполнительным механизмом, задвижки)</p>	<p>Магнитные пускатели, контакторы и т. п.</p>
	<p>Прибор для измерения положения, перемещения показывающий, установленный по месту</p>	<p>Указатель положения</p>

Графическое выполнение функциональных схем. Функциональная схема является основным техническим документом, определяющим функциональную структуру и объем автоматизации технологических установок и отдельных агрегатов промышленного объекта. Она представляет собой чертеж, на котором схематически условными обозна-

чениями изображено технологическое оборудование, коммуникации, органы управления и средства автоматизации (приборы, регуляторы, вычислительные устройства и т. п.) с указанием связей между технологическим оборудованием и элементами автоматики, а также связей между элементами автоматики. Вспомогательные устройства, не влияющие на объем автоматизации, на функциональных схемах не показывают.

Функциональную схему автоматизации технологической установки выполняют на одном чертеже, на котором изображают относящуюся к данной технологической установке аппаратуру всех систем контроля, регулирования, управления, сигнализации и защиты.

Для сложных технологических процессов с большим объемом автоматизации схемы могут быть выполнены отдельно по видам технологического контроля, управления и сигнализации.

Из функциональной схемы при ее чтении определяют:

- 1) параметры технологического процесса, которые подлежат контролю и регулированию;
- 2) функциональную структуру каждого измерительного комплекта контроля, сигнализации, автоматического регулирования и управления;
- 3) наличие автоматической защиты и аварийной сигнализации;
- 4) организацию щитов контроля и управления.

Для того чтобы составить или прочитать функциональную схему автоматизации, необходимо знать принципы построения систем технологического контроля и управления и условные изображения технологического оборудования, трубопроводов, приборов и средств автоматики, функциональных связей между отдельными приборами и средствами автоматизации и иметь представление о характере технологического процесса и взаимодействии отдельных установок и агрегатов технологического оборудования.

Техническое оборудование и коммуникации на функциональных схемах автоматизации изображают упрощенно и в сокращенном виде, без указания отдельных технологических аппаратов и трубопроводов вспомогательного назначения. Изображенная технологическая схема должна давать ясное представление о принципе работы оборудования и взаимодействии со средствами автоматизации. На технологической схеме показывают регулирующую и запорную арматуру, которая непосредственно участвует в контроле и управлении процессом.

Изображение комплектов приборов и средств автоматизации на функциональных схемах может быть выполнено упрощенным и развернутым способом.

Упрощенный способ применяют в основном для изображения приборов и средств автоматизации на технологических схемах. При этом способе не показывают первичные измерительные преобразователи и всю вспомогательную аппаратуру. Приборы и средства автоматизации, осуществляющие сложные функции (контроль, регулирование, сигнализация и т. п.) и выполненные в виде отдельных блоков, изображают одним условным графическим изображением (рис. П1, П3).

Развернутый способ применяют для выполнения функциональных схем автоматизации, когда каждый прибор или блок, входящий в единый измерительный, регулирующий или управляющий комплект, показывают отдельным условным графическим изображением (рис. П2, П4, П9).

В системах технологического контроля и управления часто применяют комбинированные и комплексные устройства (комбинированные измерительные и регулирующие приборы, машины централизованного контроля, цифровые информационные и управляющие системы на базе микропроцессорной техники, цифровые регулирующие приборы и т. п.). Такие устройства обозначают прямоугольником произвольных размеров с указанием внутри прямоугольника типа устройства по документации завода-изготовителя (рис. П8).

Всем приборам и средствам автоматизации, изображенным на функциональных схемах, присваиваются позиционные обозначения (позиции), которые сохраняются во всех материалах проекта автоматизации. Позиционные обозначения в функциональных схемах автоматизации проставляют в нижней части окружности (овала), обозначающей прибор, или рядом с условными графическими обозначениями приборов и средств автоматизации, с правой стороны или над ним.

Приборы и средства автоматизации, встраиваемые в технологическое оборудование и трубопроводы, изображают на чертеже в непосредственной близости от них. К таким средствам автоматизации относятся: отборные устройства, датчики температуры, сужающие устройства (диафрагмы), исполнительные механизмы, регулирующие органы и т. п.

Приборы и средства автоматизации, которые расположены вне щитов и не связаны непосредственно с технологическим оборудовани-

ем и трубопроводами, показывают в первом прямоугольнике в нижней части схемы с надписью «Приборы местные». Ниже располагают прямоугольники, отражающие принятую структуру расположения измерительных и регулирующих приборов. При большом числе измерительных и регулирующих комплектов, во избежание затенения схемы пересекающимися линиями связи, допускается разрыв линий связи. Разрыв линий связи производят на линиях, подходящих к приборам, расположенным в прямоугольнике «Приборы местные».

Места разрывов линий связи нумеруют слева направо арабскими цифрами. Эти же номера проставляют у разрывов линий связи первичных преобразователей и исполнительных механизмов на технологической схеме.

Для облегчения понимания сущности автоматизированного объекта и возможности выбора диапазона измерения и шкал приборов, а также уставок регуляторов на участках линий связи над верхним прямоугольником («Приборы местные») указывают предельные рабочие (максимальные и минимальные) значения измеряемых или регулируемых технологических параметров при установившихся режимах работы. Эти значения дают в единицах шкалы выбираемого прибора или в международной системе единиц.

Ниже приводятся примеры графического изображения измерительных и регулирующих комплектов по упрощенному и развернутому способам составления функциональных схем (приложение).

ПРИЛОЖЕНИЕ

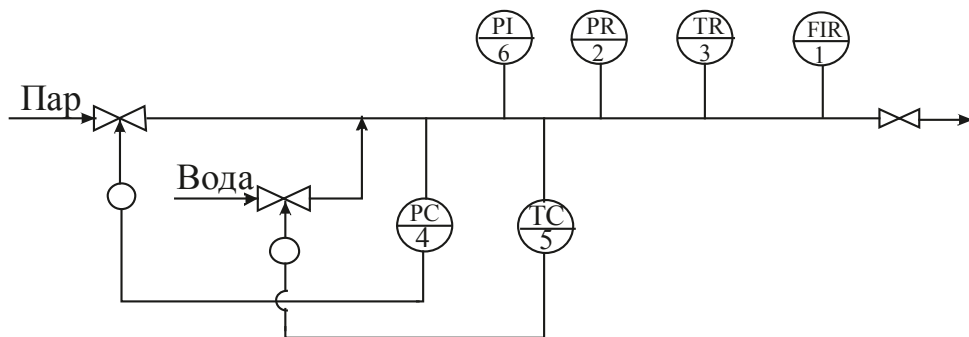


Рис. П1. Упрощенная функциональная схема контроля и регулирования редукционно-охладительной установки (РОУ) с размещением приборов на щите РОУ

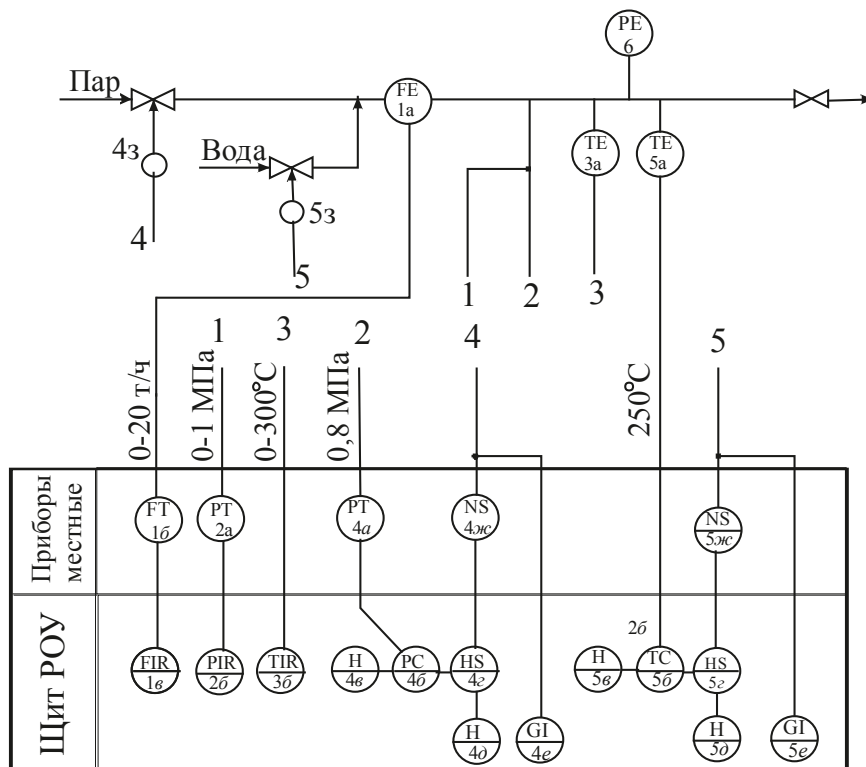


Рис. П2. Развернутая схема автоматизации РОУ

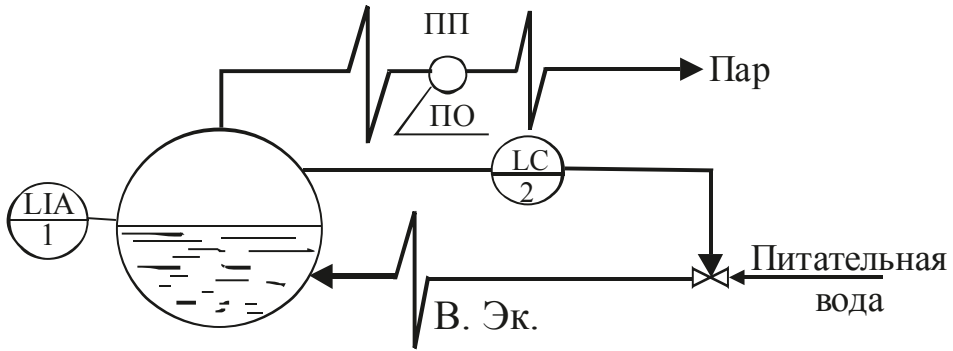


Рис. П3. Упрощенная функциональная схема контроля и регулирования уровня воды в барабане парового котла среднего давления

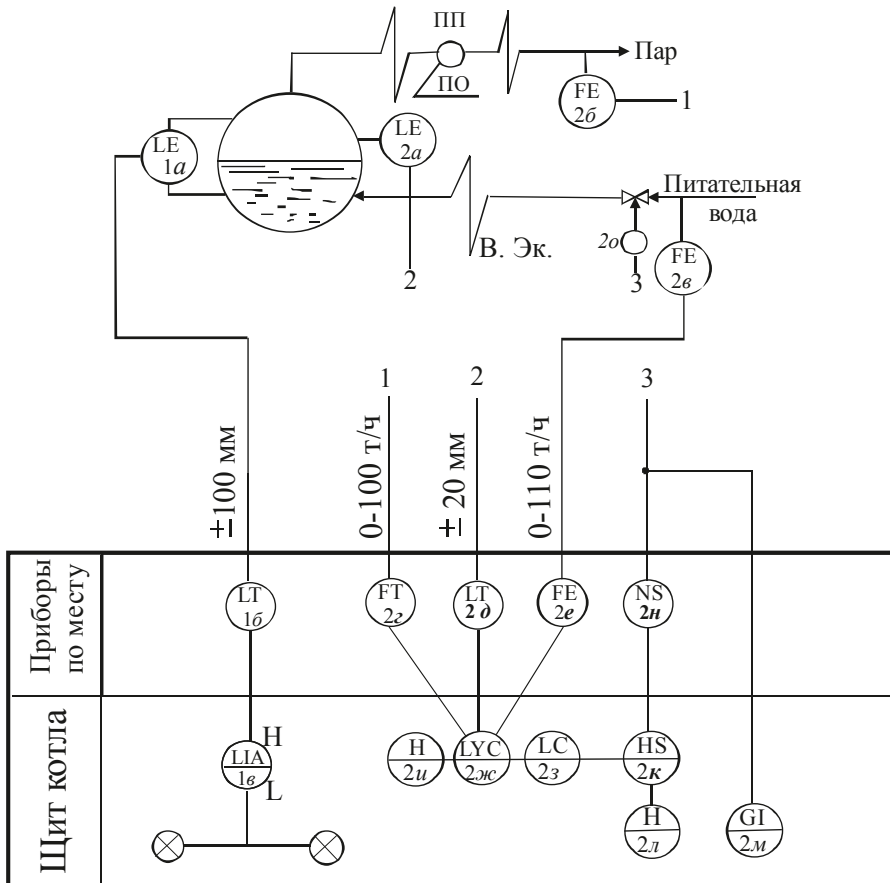


Рис. П4. Развернутая схема контроля и регулирования уровня воды в барабане парового котла среднего давления

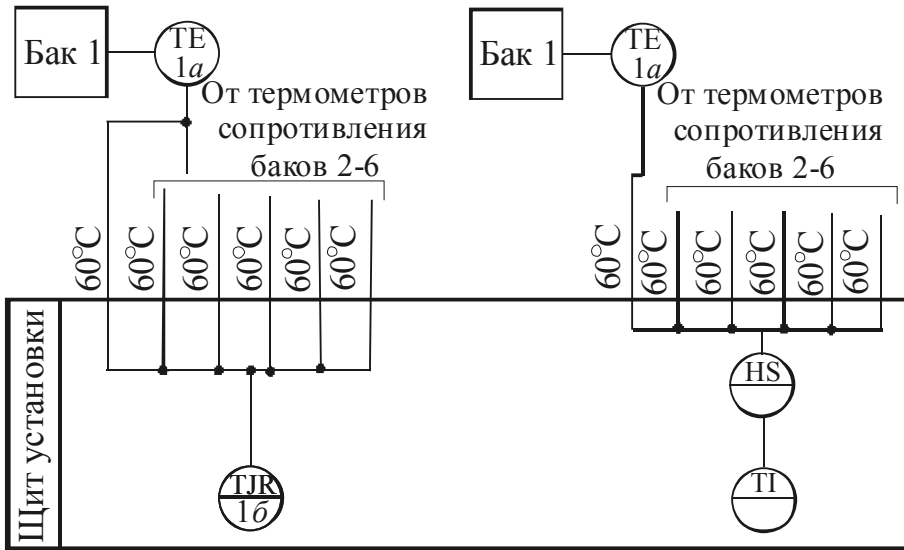


Рис. П5. Функциональная схема измерения температур на многоточечном приборе и на однотоочечном приборе с переключением

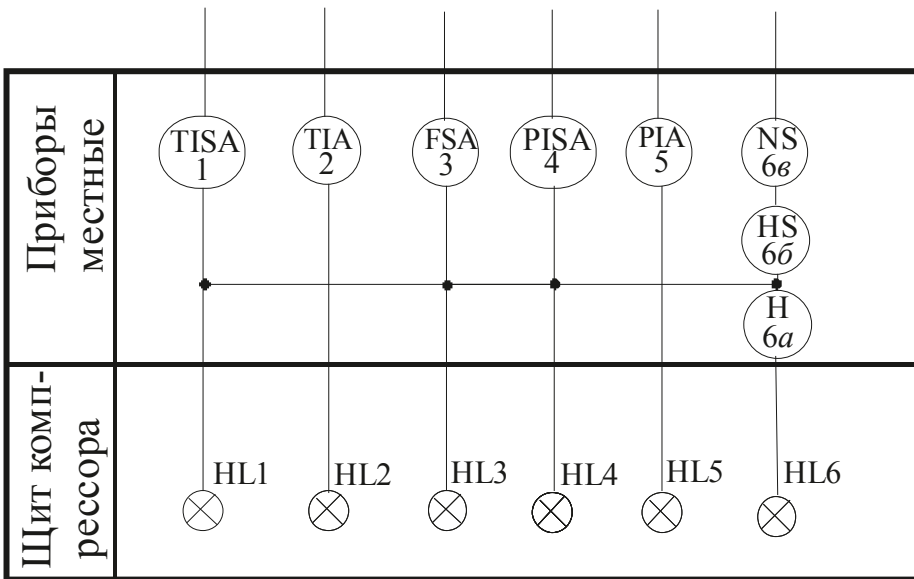


Рис. П6. Пример пересечения линий связи с соединением и без соединения друг с другом

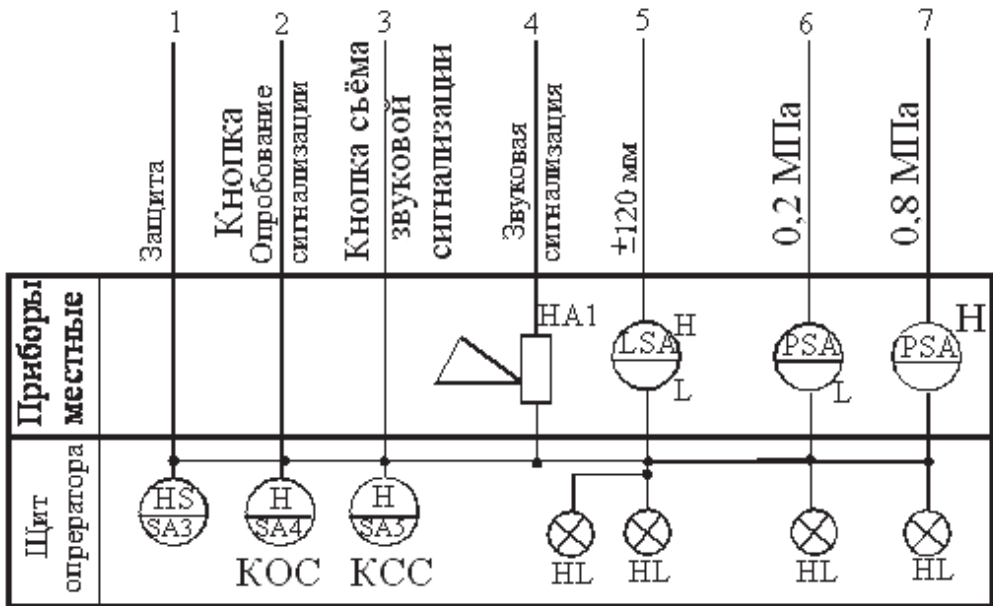


Рис. П7. Пример выполнения функциональной схемы защиты

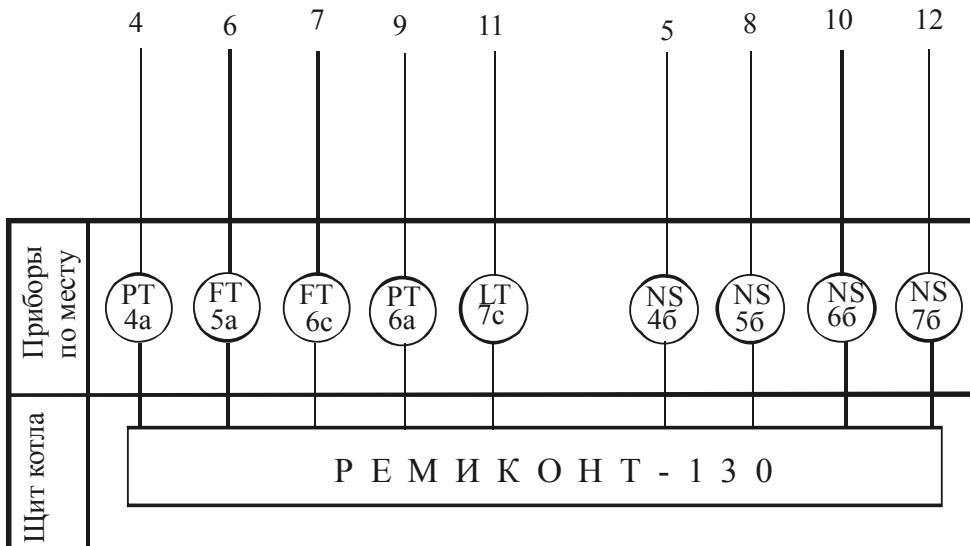


Рис. П8. Функциональная схема с цифровыми регуляторами типа «Ремиконт» (только регулирование из схемы П9)

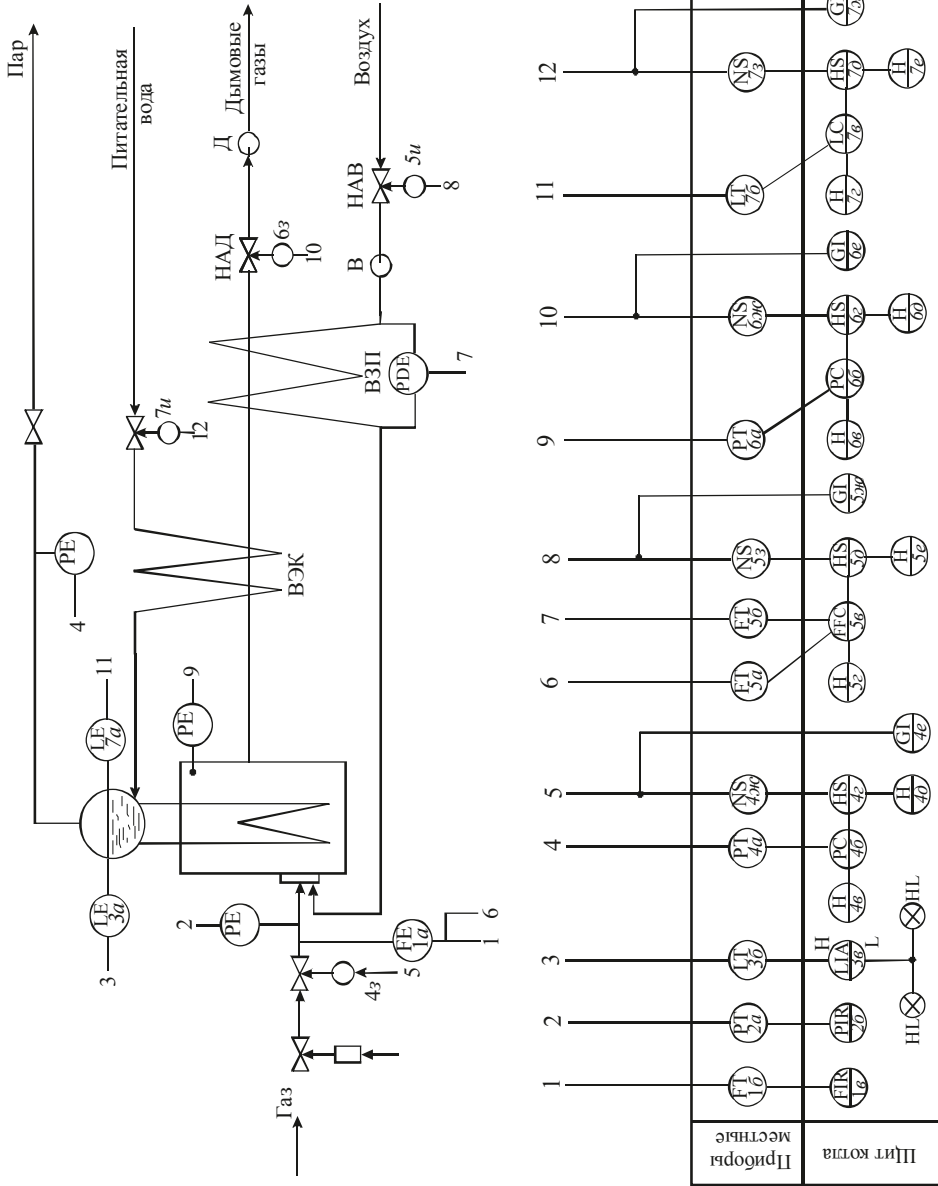


Рис. П9. Пример развернутого способа изображения функциональной схемы автоматизации парового котла

ИСПОЛЬЗОВАННЫЙ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Автоматизированные системы теплоснабжения и отопления / С. А. Чистович [и др.]. Ленинград : Стройиздат, 1987. 248 с.
- Брюханов О. Н. Газифицированные котельные агрегаты / О. Н. Брюханов, В. А. Кузнецов. Москва : Инфра-М, 2010. 391 с.
- Варфоломеев Ю. М. Отопление и тепловые сети / Ю. М. Варфоломеев, О. Я. Кокорин. Москва : Инфра-М, 2010. 480 с.
- ГОСТ 21.404—85. Условные обозначения приборов и средств автоматизации технологических процессов. Москва : Изд-во стандартов, 1985. [Б. п.].
- Калмаков А. А. Автоматика и автоматизация систем теплогазоснабжения и вентиляции / А. А. Колмаков [и др.]. Москва : Стройиздат, 1986. 479 с.
- Клюев А. С. Наладка систем автоматического регулирования барабанных паровых котлов / А. С. Клюев, А. Г. Лебедев, С. И. Новиков. Москва : Энергоатомиздат, 1985. 280 с.
- Плетнев Г. П. Автоматическое регулирование и защита теплоэнергетических установок электрических станций / Г. П. Плетнев. Москва : Энергоиздат, 1981. 368 с.
- Плетнев Г. П. Автоматическое управление объектами тепловых электростанций / Г. П. Плетнев. Москва : Энергоиздат, 1981. 368 с.
- Соколов Б. А. Устройство и эксплуатация оборудования газомазутных котельных / Б. А. Соколов. Москва : Академия, 2007. 302 с.
- Техника чтения схем автоматического управления и технологического контроля. Москва : Энергоатомиздат, 1991. [Б. п.].

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
ГЛАВА 1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ТЕОРИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ.....	6
1.1. Структура средств автоматизации	6
1.2. Теория автоматического управления (регулирования)	15
ГЛАВА 2. РЕГУЛИРУЮЩИЕ ОРГАНЫ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК	30
2.1. Общее назначение регулирующих органов.....	30
2.2. Дроссельные регулирующие клапаны.....	34
2.3. Дроссельные поворотные заслонки	47
2.4. Регулирование производительности тягодутьевых машин.....	52
2.5. Сочленение регулирующих органов с исполнительными механизмами регуляторов	55
2.6. Регулирующие органы топливоподающих устройств.....	57
ГЛАВА 3. АВТОМАТИЗАЦИЯ ПАРОВЫХ БАРАБАННЫХ КОТЛОВ.....	67
3.1. Участки регулирования барабанного парового котла	67
3.2. Регулирование тепловой нагрузки котла (расхода топлива).....	75
3.3. Регулирование экономичности процесса горения топлива (регулирование подачи общего воздуха).....	83
3.4. Автоматическая система регулирования разрежения в топке котла	90

3.5. Регулирование уровня воды в барабане котла (регулирование питания котла водой)	93
3.6. Регулирование водного режима в барабанных паровых котлах (регулирование солесодержания котловой воды)	98
3.7. Регулирование температуры перегретого пара	102
3.8. Автоматические защиты барабанных паровых котлов	107
ГЛАВА 4. АВТОМАТИЗАЦИЯ ВОДОГРЕЙНЫХ КОТЛОВ.....	116
4.1. Регулирование тепловой нагрузки отопления	142
4.2. Регулирование тепловой нагрузки вентиляции	143
4.3. Регулирование тепловой нагрузки в системе ГВС.....	144
4.4. Автоматизация центральных (ЦТП) и индивидуальных (ИТП) топливных пунктов.....	146
ГЛАВА 5. РЕГУЛИРОВАНИЕ ВОЗДУХОДУВНЫХ СТАНЦИЙ С ЦЕНТРОБЕЖНЫМИ КОМПРЕССОРАМИ.....	150
ГЛАВА 6. ПОСТРОЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СХЕМ АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ.....	158
ПРИЛОЖЕНИЕ	178
ИСПОЛЬЗОВАННЫЙ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	183

Учебное электронное сетевое издание

Голдобин Юрий Михайлович
Павлюк Елена Юрьевна

АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Редактор И. В. Меркурьева
Верстка Е. В. Ровнушкиной

Подписано в печать 07.12.2017.
Уч.-изд. л. 6,3. Формат 70×100 1/16.

Издательство Уральского университета
Редакционно-издательский отдел ИПЦ УрФУ
620049, Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 5
Тел.: 8 (343) 375-48-25, 375-46-85, 374-19-41
E-mail: rio@urfu.ru

