

ГОУ ВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Обогащение полезных ископаемых»



КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ

По курсу

«АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ОБОГАЩЕНИЯ ПОЛЕЗНЫХ  
ИСКОПАЕМЫХ»

Донецк  
2019



ГОУ ВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Обогащение полезных ископаемых»

КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ

по курсу

«АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ОБОГАЩЕНИЯ ПОЛЕЗНЫХ  
ИСКОПАЕМЫХ»

(для студентов специальности 21.05.04 "Горное дело" специализации  
"Обогащение полезных ископаемых")

Утверждено  
научно-издательским советом ДонНТУ  
Протокол №     от     . 2019 г.

Утверждено на заседании  
методической комиссии по специальности  
"Обогащение полезных ископаемых"  
Протокол № 2 от 04     февраля 2019 г.

ББК 33.4

УДК 622.7.09(075.8)

Корчевский А. Н. Автоматизация процессов обогащения полезных ископаемых. Конспект лекций. Донецк: ДонНТУ. 2019. - 72 с.

<b>Содержание</b>		
№	Наименование	С.
	<b>Введение. Общие представления об управлении процессами</b>	7
<b>1</b>	<b>Процессы обогащения как сложные объекты управления</b>	9
1.1	Сложность процессов обогащения	9
1.2	Элемент неопределенности систем и их вероятностные характеристики	10
1.3	Элементы саморегулирования и обратная связь в обогатительных процессах	12
<b>2</b>	<b>Критерии оптимизации процессов обогащения и их свойства</b>	14
2.1	Принципы формирования критериев	14
2.2	Сложность и многофакторность критериев	14
2.3	Вероятностный смысл критериев	16
2.4	Целевые функции и ограничения. Классификация критериев	17
2.5	Классификация целевых функций (критериев оптимизации)	19
<b>3</b>	<b>Применение методов прикладной кибернетики при проектировании АСУ</b>	22
3.1	«Черный ящик» и математические модели	22
3.2	Математическая статистика в исследованиях по управлению процессами обогащения	25
3.3	Математическое программирование экстремальных задач	28
<b>4</b>	<b>Основные направления использования статистических методов при разработке принципа управления процессами</b>	31
4.1	Техника постановки экспериментов по исследованию процесса	31
4.2	Статистические оценки результатов экспериментов	32
4.3	Планирование экстремальных экспериментов	34
4.3.1	Полный факторный эксперимент	35
4.3.2	Дробный факторный эксперимент	36
4.3.3	Экспериментальный поиск экстремума функции отклика	37
4.3.4	Нахождение математической модели экстремальной области процесса	43
<b>5</b>	<b>Анализ влияния входных факторов и возмущений на основные обогатительные операции и выбор каналов управления</b>	45
5.1	Гравитационные процессы обогащения	45
5.1.1	Отсадочные машины с роторным разгрузчиком	45
5.1.2	Обогащения в тяжелосредных сепараторах	47
5.2	Флото-фильтровальное отделение	49
5.2.1	Флотационный процесс	49
№	Наименование	С.
5.2.2	Процесс обезвоживания флотоконцентрата на вакуум-	52

	фильтре	
<b>6</b>	<b>Анализ влияния входных факторов и возмущений на вспомогательные процессы и выбор каналов управления</b>	<b>55</b>
6.1	Особенности сушильных установок как объектов управления	55
6.2	Схема автоматизации топки с цепной решеткой	56
6.3	Схемы автоматизации сушильных установок	57
6.4	Процесс сгущения пульпы	59
<b>7</b>	<b>Особенности автоматического управления процессами рудного обогащения</b>	<b>63</b>
7.1	Автоматизация рудоподготовки	63
7.1.1	Автоматический контроль процесса дробления	63
7.1.2	Автоматическое регулирование процесса дробления	64
7.2	Измельчение	66
7.2.1	Автоматический контроль процесса измельчения	66
7.2.2	Автоматизация процесса измельчения	67
7.2.3	Автоматизация процессов магнитного обогащения	68
	Перечень источников	69

## Введение.

### Общие представления об управлении технологическими процессами

Главная цель управление процессами обогащения состоит в поиске и поддержания технологических режимов, обеспечивающих наилучшее соотношение между количеством концентрата, его качеством и издержками производства.

**Технология** (от греч. *téchne* - искусство, мастерство, умение и **...логия**), совокупность приёмов и способов получения, обработки или переработки сырья, материалов, полуфабрикатов или изделий, осуществляемых в различных отраслях промышленности, **научная дисциплина, разрабатывающая и совершенствующая способы управления процессами.**

Технологией (или технологическими процессами) называются также сами операции добычи, обработки, переработки, транспортирования, складирования, хранения, которые являются основной составной частью производственного процесса. В состав современной технологии включается и технический контроль производства. Технологией принято также называть описание производственных процессов, **инструкции по управлению процессами**, технологический регламент, технологические правила, требования, карты, графики и др.

Технология обычно рассматривают в связи с конкретной отраслью производства. В **результате осуществления технологических процессов происходит качественное изменение обрабатываемых объектов.**

**Технологическая подготовка производства** - это совокупность методов организации, **управления** и решения технологических задач на основе применения комплексной автоматизации, экономико-математических моделей и средств технического оснащения.

В зависимости от степени участия человека в управлении различают следующие разновидности систем управления.

**Системы ручного управления**, в которых все функции анализа состояния объекта, принятия решений о воздействии на него и осуществления этих решений, а также часть функций контроля выполняет человек. Обычно это аппаратчик, непосредственно обслуживающий один или несколько технологических аппаратов — объектов управления.

**Системы автоматического контроля и ручного дистанционного управления**, с помощью которых человек управляет технологическим процессом на отдельном производственном участке. Вся информация о состоянии объекта определяется показаниями автоматических контрольно-измерительных приборов; решение о необходимых воздействиях на процесс и их осуществление принадлежит человеку, который находится в общем пункте управления и оперирует специальными устройствами дистанционного управления.

**Системы частичной автоматизации**, обеспечивающие автоматическое управление технологическим процессом по некоторым из его параметров.

Остальные параметры охватываются системой автоматического контроля и дистанционного управления.

**Системы комплексной автоматизации**, полностью обеспечивающие автоматическое управление технологическим процессом в режиме нормальной эксплуатации и частично при пуске-останове и в аварийном режиме. Неавтоматизированные функции управления в двух последних режимах осуществляет человек с помощью устройств дистанционного управления. Кроме того, в таких системах для всех параметров обычно предусматривается возможность перехода с автоматического управления на ручное (дистанционное) и обратно.

**Системы полной автоматизации**, обеспечивающие автоматическое управление технологическим процессом в любом возможном режиме его работы.

Выбор той или иной системы управления зависит от многих причин, главные из которых — технический уровень производства, степень его механизации, изученность технологического процесса, наличие необходимых технических средств автоматизации и, прежде всего, средств получения информации о технологических параметрах, экономическая эффективность предлагаемой системы управления. Однако в целом достигнутому в настоящее время уровню теории и особенно техники автоматического управления непрерывными технологическими процессами в наибольшей степени соответствует применение систем комплексной автоматизации в масштабе производственных участков, отделений и цехов.

## 1 Процессы обогащения как сложные объекты управления

### 1.1. Сложность процессов обогащения

Применение современных методов автоматического управления системами предполагает точную, в некотором смысле формальную постановку задачи, по возможности в виде математического выражения. Современные средства вычислительной техники в принципе способны решить задачу любой сложности, если известен алгоритм решения, т. е. последовательность простых логических и арифметических действий, в результате которых принимается решение.

Управление процессами на фабрике, исследование сырья на обогатимость, изыскание методов комплексного использования сырья, разработка эффективной и экономичной схемы обогащения - являются сложнейшими задачами со многими неизвестными. Каждый фактор, влияющий, например, на процесс флотации, связан с десятками других, зависящих от него, влияющих на него и друг на друга, факторов.

Увеличение сложности ставит перед учеными и инженерами качественно новые задачи, которые решаются с помощью новых дисциплин, например, недавно возникшей **системотехники - науки о проектировании сложных и больших систем.**

Сколь ни различными кажутся нам, на первый взгляд, причины увеличения сложности в живом организме и в процессах обогащения полезных ископаемых, все же можно подметить здесь некоторую общность. Она состоит в увеличении числа взаимосвязанных между собой причин (факторов), воздействующих на объект (в кибернетике объект исследования называется системой).

Сложность технологических схем, а, следовательно, и систем управления ими является неизбежным спутником комплексности переработки. Характерными особенностями этой сложности являются:

- ❖ многообразие процессов, применяемых на одном предприятии, в том числе процессов из смежных циклов (горнодобычных, гидро- и пирометаллургических) наряду с обогатительными;
- ❖ получение большого числа промежуточных продуктов, накапливаемых и циркулирующих в схеме;
- ❖ получение многоотраслевой товарной продукции из одного и того же сырья: цветных и черных металлов, химических продуктов и стройматериалов;
- ❖ использование на одном предприятии различных аппаратов и материалов, выпускаемых разными предприятиями.

В качестве примера сложности технологических схем приведем количественные данные по процессу флотации на Гайской медно-цинковой флотационной фабрике. Схема обогащения содержит шесть крупных циклов:

два коллективных, два промпродуктовых и общий цикл медной и цинковой флотации.

Перечень и число управляющих воздействий на одной из секций Гайской фабрики

Управляющие воздействия	Число точек
Подача:	
ксантогенатов	33
аэрофлотов	3
вспенивателей	11
медного купороса	13
цинкового купороса	2
сернистого натрия	3
известкового молока	15
активированного угля	1
транспортной воды	60
Изменение выходов шиберами	90
<b>В с е г о</b>	<b>231</b>

Схема содержит 425 флотационных камер, которые могут быть использованы в разнообразных сочетаниях. Таким образом, технологический процесс выпуска двух концентратов имеет 656 степеней свободы. Сложность предопределяется не только числом степеней свободы, но и нелинейным характером взаимосвязи параметров. Так, если за меру сложности принять число коэффициентов модели объекта, то для линейного объекта без взаимодействия (случай невероятный) мера сложности  $W$  может быть принята равной  $n$ ;

$$W = n,$$

где  $n$  — число факторов.

В этих условиях отношение к исследованию на обогатимость и управлению флотационным процессом со стороны некоторых обогатителей как к искусству, а не как к технической проблеме, оправдывается наличием субъективных факторов и оценок. Этим же объясняется отставание теории флотации от практики, полуэмпирический поиск режимов обогащения.

## 1.2. Элемент неопределенности систем и их вероятностные характеристики

Неопределенность и непредсказуемость поведения рассматриваемой нами системы, иначе говоря, технологических показателей работы обогатительной фабрики, является следствием, по крайней мере, четырех причин.

Пользуясь выводами предыдущего раздела, мы можем сказать, что **одной из причин такой неопределенности является сложность процесса**, невозможность учета всех факторов и их взаимодействия. Мы можем на основе нашего опыта работы только ожидать тех или иных результатов с некоторой, большей или меньшей, вероятностью.

Количество вариантов, определяемое существующей сложностью процесса, исчисляется астрономическими цифрами. Например, по подсчетам Л. П. Шупова, если нам предстоит выбрать схему из десяти операций, в результате каждой из которых получаются два продукта обогащения, и хотя бы 0,001% всех возможных сочетаний операций и комбинаций продуктов имеет реальный смысл, то вариантов схем останется  $2,36 \cdot 10^{13}$ .

Представим себе, что мы могли бы предсказать результаты обогащения при некотором определенном сочетании значений параметров процесса: переработки, рН, расходов реагентов, плотностях пульпы и т. д. Неопределенность конечного результата сохранилась бы и в этом случае из-за постоянного неконтролируемого изменения всех параметров, их колебаний вследствие различных технических причин.

Впервые применивший статистическое планирование эксперимента к обогащению А. Доренфельд пишет: «.. на обогатительной фабрике есть только одна постоянная вещь — изменчивость факторов и только статистические методы позволяют упорядочить результаты этого беспорядка».

Таким образом, **второй причиной неопределенности является неконтролируемое изменение параметров.**

**Третья причина неопределенности связана с массовостью процесса обогащения и его стохастичностью.** Число элементарных агрегатов — частиц, подлежащих разделению на обогатительной фабрике, огромно. На фабрике, например, производительностью 35 тыс. *t* руды в сутки в каждую секунду в процесс поступает 900 млрд. частиц, а за смену через нее проходит  $2,6 \cdot 10^{16}$  частиц.

В процессах разделения, особенно тонких и сложных по своей технологии, всегда существует определенная вероятность того, что даже при четком различии свойств разделяемых частиц часть их попадает не в свой продукт. Следовательно, произойдет некоторое загрязнение очищаемого вещества чужеродными частицами, с одной стороны, и недоизвлечение частиц данного вещества в одноименный продукт, с другой.

Случайный характер причин, влияющих на процесс, и их массовость вызывают необходимость использовать для оценки разделения вероятностные характеристики.

Вероятностный характер обогатительных процессов связан с вероятностью локальных событий, определяющих весь процесс в целом.

Например, вероятность извлечения частицы в пенный концентрат при флотации определяется вероятностью выполнения следующих событий:

- ❖ частица должна осуществить контакт с каплей реагента-собирателя с образованием гидрофобной поверхности;
- ❖ гидрофобизированная частица должна встретиться с пузырьком воздуха;
- ❖ пузырек воздуха должен закрепиться на поверхности частицы;
- ❖ подъемная сила пузырька должна быть больше силы тяжести частицы;

- ❖ комплекс частица-пузырек должен не разрушиться под действием механических сил, действующих в камере машины в процессе его подъема в пенный слой;
- ❖ пузырек воздуха не должен лопнуть на поверхности пены при контакте ее с пеногоном.

Все технологические показатели разделительных процессов являются, таким образом, не чем иным, как интегральными или усредненными характеристиками. В этом смысле детерминированное описание обогатительных процессов с использованием лишь физических параметров и характеристик отдельных частиц невозможно.

**Наконец, четвертой причиной неопределенности является существование погрешностей, связанных с несовершенством разделительных аппаратов, а также с существованием частиц с промежуточными свойствами — изоморфных.**

Таким образом, в результате промышленного разделительного процесса из исходной смеси получаются не чистые вещества, а только в той или иной степени обогащенные или обедненные продукты.

Из всех разделительных процессов с точки зрения математического описания (но не физико-химической основы) наиболее сложным является обогащение руд. Это объясняется следующим.

Во-первых, в обогатительных процессах встречается самый широкий диапазон концентраций ценных компонентов в исходном сырье и продуктах обогащения.

Во-вторых, наличие сростков минералов дает в процессе целую гамму частиц с промежуточными свойствами между ценным компонентом и пустой породой, что заставляет дополнительно вводить в уравнение статистически распределенные переменные вместо постоянных, оценивающих стабильные характеристики молекул и ионов в других процессах.

В-третьих, в обогатительных процессах участвует целый комплекс разнородных минералов, имеющих к тому же разновидности и различные составы даже в пределах одного месторождения. При этом необходимо учитывать возможности комплексного обогащения с получением нескольких концентратов или получение концентрата различных по свойствам минералов, но содержащих один и тот же ценный минерал.

### **1.3. Элементы саморегулирования и обратная связь в обогатительных процессах**

Элементы саморегулирования являются наиболее важными в кибернетических системах. Более наглядно саморегулирование (**гомеостазис**) проявляется в живых организмах. Например, известно, что температура человека очень мало меняется, даже когда он переходит из холодильника в сушильный цех. В животном мире примером гомеостазиса является равновесие

между количеством различных животных, например птиц и поедаемых ими гусениц.

При использовании механизма управления с обратной связью переменные не выходят за установленные пределы, кроме случая, когда механизм вышел из строя. Это объясняется тем, что самодвижение за пределы ограничений вызывает появление управляющего воздействия. Регулятор с обратной связью гарантирует компенсацию возмущений не только определенного вида, но и любых возмущений вообще. При весьма несложной конструкции он реагирует на большое число источников возможных возмущений. В частности, он компенсирует влияние на систему возмущений, причина возникновения которых совершенно неизвестна. В этом заключается важность принципа обратной связи, поскольку в кибернетике мы имеем дело с очень сложными системами, не поддающимися детальному описанию. Чтобы получить возможность управлять такими системами, мы должны предусмотреть управляющий механизм, способный выполнять функции, которые нам не ясны, хотя мы сами строим этот механизм. Для вероятностных систем обратная связь является единственным действительно эффективным механизмом управления.

Управление процессом по самой своей сути предполагает наличие некоторых возмущающих воздействий, которые должны компенсироваться управляющими воздействиями. Основным возмущающим воздействием на обогатительной фабрике является характер сырья (крупность, степень окисленности, содержание извлекаемого минерала и т. п.) Но оператор обогатительных процессов фактически не знает об этих возмущениях, так как непосредственный контроль их отсутствует. Он может судить об изменениях возмущающих воздействий по изменению характера процесса! Поэтому если наблюдаемые изменения в процессе невелики, то опытный обогатитель предпочитает «не дергать процесс».

Причина саморегулирования на обогатительных фабриках, по мнению ряда авторов, заключается в наличии множества «обратных связей», осуществляющихся с помощью, так называемых циркулирующих продуктов. В цикле измельчения циркулирующая нагрузка в системе мельница — классификатор позволяет выдавать практически более или менее постоянный по крупности слив в широком диапазоне колебаний производительности, шаровой загрузки и т. д. В цикле флотации циркулирующие промпродукты позволяют получать более или менее стабильное извлечение и качество концентратов даже при существенных колебаниях расходов реагентов. Заметим также, что некоторые реагенты (пенообразователи, мыла, ксантогенаты) способны поддерживать долгое время (десятки минут) постоянную концентрацию за счет преимущественного перехода в пенные промпродукты, а собиратели еще и за счет постоянства константы гидролиза (для мыл).

Аналогичная закономерность имеется для некоторых других реагентов. В гравитационных процессах результаты обогащения в широком диапазоне производительности аппаратов получаются близкими к кривым обогатимости.

Таким образом, процесс обогащения характеризуется всеми признаками кибернетической системы: сложностью, вероятностным характером и наличием элементов саморегулирования, осуществляемого обратными связями.

## 2. Критерии оптимизации процессов обогащения и их свойства

### 2.1. Принципы формирования критериев

Критерий оптимизации, эффективность, функция цели — формализованный смысл наших стремлений и степень понимания, что хорошо и что плохо. В любой работе выбор критерия предопределяет ее успех. В системном анализе это основной и труднейший вопрос, от решения которого зависят все стадии исследования: сбор информации, моделирование, метод оптимизации, принятие решения, результат.

Простота и легкость выбора критериев в повседневной жизни лишь кажущиеся. На самом деле они подготовлены всем прошедшим опытом, воспитанием и характером.

Инженеры, исследователи, экономисты и проектировщики непрерывно предлагают новые «универсальные, точные и ясные» целевые функции. В 1967 г. одному из авторов удалось собрать свыше ста критериев оптимизации разделительных процессов. После их классификации выяснилось, что универсального критерия нет, а выбор критерия оптимизации или эффективности процесса — задача не простая.

Выбору критерия эффективности посвящено значительное число работ, относящихся не только к разделительным процессам, но и к самым различным областям — от экономики до системотехники. Первоначально эти исследования имели чисто познавательное значение и позволяли оценивать результаты работы человека. По мере развития математики, а затем и автоматизации выбор критерия оптимальности стал технической необходимостью, обуславливающей не только точность постановки конкретной задачи, но и быстроту ее решения.

Рассмотрим характерные черты объекта - критерия оптимизации - с позиций системного анализа.

### 2.2. Сложность и многофакторность критериев

Как и всякий сложный процесс, работа обогатительной фабрики или аппарата характеризуется рядом выходных показателей. Среди них:

- непосредственно измеряемые, такие как выход концентрата  $\gamma$ , содержание полезных компонентов в концентрате и  $\beta$  в хвостах  $\nu$  и объем переработки  $Q$ ;
- вычисляемые технологические критерии: извлечение  $\varepsilon$  коэффициент селективности  $S$  и др.;
- технико-экономические, вычисляемые с использованием первых двух

групп, цен и затрат: себестоимость переработки 1 т руды и концентрата, рентабельность, прибыль, производительность труда и т. д.

В промышленных разделительных процессах полного разделения достигнуть невозможно. Получаются только обогащенный и обедненный каким-либо компонентом продукты. С увеличением полноты разделения процесс становится более дорогим, а производительность аппаратов резко снижается. Поэтому на каком-то этапе более выгодно перерабатывать дополнительное количество сырья с целью получения того же выхода готовой продукции, какое может быть получено при большем извлечении из меньшего исходного количества сырья. Извлечение в концентрат ценного компонента (или потери его с отходами) является одной из важнейших характеристик разделительного процесса. Поскольку извлечение связано с производительностью разделяющей установки, в конечном счете, требуется лишь получить определенное количество готовой продукции, то производительность по готовому продукту — второй важнейший критерий разделения. Он экономически связан с первым через себестоимость сырья и готовой продукции, а технологически эти два критерия противоречат друг другу — с ростом производительности падает извлечение и наоборот.

Третья характеристика процесса разделения — качество концентрата (содержание в нем ценного компонента) особенно важна в тех процессах (чаще всего промежуточных), где допустимы широкие колебания этого параметра. Качество концентрата может быть тем выше, чем ниже производительность (или себестоимость переработки) и извлечение. Качество и извлечение связаны друг с другом через функцию извлечения от содержания исходного сырья в процессах доводки или последующей переработки концентрата. Таким образом, основные критерии процесса связаны между собой так, что рост эффективности любого из них снижает в какой-то мере эффективность других. Это усложняет оценку эффективности. Дополнительные трудности возникают при оценке разделения многокомпонентных смесей с получением нескольких продуктов, ценность которых различна.

Очевидно, что один показатель, например извлечение, не может быть критерием разделения без учета качества концентрата. В этом случае выгоднее не обогащать руду, поскольку извлечение в таком процессе будет 100%.

При сравнении экспериментов или оптимизации процесса разделения комплексных продуктов приходится учитывать сразу несколько показателей, находящихся друг с другом в сложных экономических и технологических зависимостях.

Естественным выходом в условиях многофакторности критериальной оценки является создание компромиссного критерия, учитывающего сразу несколько выходных параметров. Известно, что, например, режим эксплуатации транспортных средств выбирается на основе компромисса между безопасностью и скоростью. Но, идя на компромисс, необходимо четко сознавать, из каких компонентов и в каких соотношениях формируется критерий, характеризует ли он эффективность процесса с точки зрения конечной цели данного производства.

Наиболее универсальными и достаточно полными являются экономические критерии — один из самых распространенных видов компромисса. К экономическим критериям могут быть отнесены все другие виды критериев, в то время как экономические факторы характеризуют такие свойства процессов, которые не могут быть выражены даже совокупностью всех других критериев. Эффективность процесса в стоимостном выражении включает в себя качество полученных продуктов разделения, извлечение (степень использования сырья), производительность, (степень использования аппаратуры), а также затраты электроэнергии, реагентов, рабочей силы и т. д. Однако такое интегральное выражение эффективности предусматривает прежде всего упорядоченность системы ценообразования, в точности соответствующей затратам на производство любых материалов.

Универсальность и интегральный характер экономических критериев делают их наиболее перспективными в области управления промышленными процессами. Однако нельзя не отметить, что использование этих критериев для исследования, а в ряде случаев и для регулирования процесса вызывает существенные трудности, даже если предположить, что система цен построена правильно и отражает затраты на производство любой продукции. Среди этих трудностей, прежде всего, следует указать на непрерывно меняющуюся в более быстром темпе стоимость промышленных продуктов, за которой не может успеть **никакая** даже самая гибкая система ценообразования.

Другой существенной трудностью для применения экономических критериев является необходимость установления цен на промежуточные продукты, а также затрат на различные операции. Попытка точной регламентации всех операций может привести к такой трудоемкой системе контроля, которая окажется неприемлемой.

### **2.3. Вероятностный смысл критериев**

Стохастичность объектов должна быть учтена и при формировании критерия оптимизации. Она связана с массовостью, наличием частиц с промежуточными свойствами и несовершенством обогатительных аппаратов. Случайный характер этих причин вызывает необходимость использовать вероятностные характеристики для оценки разделения. Все технологические показатели разделительных процессов являются, таким образом, интегральными или усредненными характеристиками соответствующих вероятностей.

При выборе критерия необходимо стремиться к тому, чтобы он как можно менее зависел от случайных колебаний процесса (статистическая эффективность) и как можно более — от регулируемых воздействий на процесс (чувствительность критерия). Статистическая эффективность критерия является до некоторой степени противоположной требованию чувствительности к изменениям параметров процесса. Физический смысл статистической эффективности — нечувствительность к небольшим случайным колебаниям, математическая оценка - дисперсия, среднее квадратическое отклонение значений критерия для

одинаковых опытов, характеризующее разброс относительно среднего значения.

Например, при обогащении руд с низким содержанием ценного компонента и малым выходом концентрата (в частности молибденового) выход хвостов близок к 100%, т. е. почти равен по массе, поступившей на обогащение руде. В этом случае извлечение металла в хвосты прямо пропорционально содержанию его в хвостах. Следовательно, оно может служить таким же критерием разделения, как и извлечение в концентрат, т. е. равно 100% минус извлечение в хвосты. Однако извлечение в концентрат, которое рассчитывается по результатам анализа более богатых продуктов (концентрата и исходной руды), имеет меньшую ошибку (дисперсию), чем результаты измерения содержания металла в хвостах. С этой точки зрения извлечение в концентрат — критерий статистически более эффективный, чем содержание металла в хвостах.

Вариация измеряемых параметров зависит, с одной стороны, от изменения режимных условий, с другой, — от ошибок измерения этих параметров, т. е. от ошибок воспроизводимости эксперимента. Таким образом, лучшими параметрами можно считать те, которые обладают большим процентом вариации и достоверностью данных при расчете критерия в практических условиях.

Оценкой достоверности может служить коэффициент вариации и дисперсия параметра, вычисленная по данным параллельных определений. Ошибка определения критерия также может быть определена по дисперсии воспроизводимости параметров, входящих в формулу критерия.

Для оценки чувствительности по результатам экспериментов вычисляются дисперсия и коэффициент вариации параметров. Чувствительность тем больше, чем больше коэффициент вариации, если ошибка воспроизводимости по данному параметру не слишком велика.

#### 2.4. Целевые функции и ограничения. Классификация критериев

Все выходные параметры являются критериями оптимизации процесса. Одни из них требуется по возможности довести до экстремального значения, другие — только до заранее заданного предела, на котором они должны быть стабилизированы. В соответствии с этим различают функции цели и ограничения.

**Целевая функция** — это строгая формулировка цели, которой нужно достичь в результате исследования или **управления**. Если  $y_1$  и  $y_2$  — некоторые выходные показатели, то целью может быть стабилизация  $y_1$  при произвольном  $y_2$

$$y_1 = \text{const},$$

экстремизация (минимизация либо максимизация)  $y_1$  при произвольном  $y_2$ .

$$y_1 = \text{extr}$$

и достижение условного экстремума

$$y_1 = \text{const}$$

$$y_2 = \text{const}$$

Любой технологический процесс связан со многими ограничениями, которые обязательно должны учитываться при формулировке цели. Наконец, в большинстве случаев упрощение математической формулировки цели управления связано с необходимостью учета реальных возможностей расчетов целевой функции в приемлемое для целей управления время. Желательно, чтобы любая упрощенная запись цели управления достаточно строго вытекала из общей записи.

Рассмотрим наиболее характерные ограничения, накладываемые на управление процессом.

Важнейшим является ограничение, накладываемое на содержание  $\beta$  основного металла в концентрате. Обычно это ограничение типа неравенства

$$\beta > \beta_{\text{зад}}$$

где  $\beta_{\text{зад}}$  — заданное содержание основного металла в концентрате

Часто накладываются ограничения на содержание  $\beta_{\text{пр}}$  каких-либо примесей в концентратах

$$\beta_{\text{пр}} < \beta_{\text{пр. пред}}$$

где  $\beta_{\text{пр. пред}}$  — предельное значение содержания  $i$ -ой примеси в концентрате.

При угольном обогащении целевой функцией может быть условие

$$A_{\text{отх}} \rightarrow \max$$

при ограничении, например,  $A_{\text{кон}} < 8,0 \%$ .

Другим ограничением, играющим большую роль, является ограничение, накладываемое на производительность по исходному продукту.

Плановые и предельные значения параметров могут быть переменными и связанными либо с условиями обогащения, либо с изменением условий работы поставщиков и потребителей сырья.

Целый ряд параметров процесса имеет технические ограничения, например, расход воды  $Q_B$ , реагента  $q_p$ , циркулирующая нагрузка  $Q$  и пр.

Наконец, ограниченными являются возможности технологического персонала по управлению.

С математической точки зрения конечной целью является достижение экстремума некоторой функции (функционала)  $F$

$$F = f(X, Y, Z, U, t),$$

где  $X$  — возмущающие воздействия;  $Y$  — выходные показатели;  $Z$  — управляющие воздействия;  $U$  — помехи;  $t$  — время.

На все составляющие функции  $F$  наложены ограничения типа равенств или неравенств.

Если процесс является непрерывным, все входные и выходные величины, как и критерий эффективности, являются функциями времени. Если вычисляется некоторый сводный показатель  $F$  по измеряемым входным и выходным величинам, то необходимо компенсировать погрешности, связанные с

**динамическими свойствами объекта.** Одним из способов компенсации являются сдвиг реализаций на величину транспортного запаздывания и усреднение измеряемых величин.

В связи с наличием большого числа предложенных формул для целевых функций выбор нужной формулы — задача сложная. Дело в том, что после того как предложена новая формула, ее часто начинают рассматривать в отрыве от тех условий, для которых она сформулирована.

## 2.5. Классификация целевых функций (критериев оптимизации)

В результате разделительных операций получают, по крайней мере, два продукта, каждый из которых характеризуется определенным выходом  $\gamma$ , массой  $P$ ,  $W$  и качеством  $\beta$ ,  $v$ . По ним можно вычислить извлечение  $\varepsilon$ .

Измеряемые выходные параметры процесса могут в **простых случаях** служить критериями оптимизации. Поскольку они являются результатом измерения одного параметра, назовем их однопараметрическими.

Технологические критерии представляют собой комбинацию основных параметров обогащения:  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $v$  и др.

Технологические критерии позволяют сравнивать технологию процесса без учета производительности и других экономических характеристик. Такой подход отличается простотой и наглядностью. Технологические критерии подразделяются на группы в зависимости от числа измеряемых параметров, участвующих в формуле в явном или неявном виде.

Существует большое количество технологических критериев, их выбор для целей управления – сложная и ответственная задача.

Особо следует отметить класс технологических критериев, выводимых из термодинамических представлений о процессе разделения.

Критерием интенсивности и направления протекания процессов в термодинамике является **энтропия**.

Считая имеющуюся смесь статистической системой, в которой число состояний определяется числом компонентов, а их вероятности — концентрациями этих компонентов, можно ввести понятие энтропии смеси как меру разнородности состава этой смеси или продуктов ее разделения.

Энтропийный критерий эффективности разделения удобен тем, что он может быть распространен на систему с любым числом компонентов, продуктов разделения и исходных продуктов. Известны попытки применить энтропию для оценки обогащения углей (Э. Э. Рафалес - Ламарка), руд (В. И. Кармазин) и других компонентов.

Однако энтропийный критерий разделения оказался неудачным для характеристики обогатительного процесса с целью управления им по ряду причин (сложность вычисления, неявная связь с конкретными показателями процесса и продуктов обогащения..).

**Кинетические критерии** разделения могут применяться во многих случаях, особенно когда важно знать скорость протекания процесса во времени или соотношение эффективности в зависимости от времени.

Простейшим примером кинетического критерия является производительность в единицу времени, например, переработка руды (т/ч), выдача концентрата (кг/смену) и т. д., так как это усредненные характеристики изменения соответствующих параметров во времени.

**Статистические критерии** разделения предполагают наличие большого числа данных статистической выборки, на основании которой строятся критерии этого типа. В основе построения лежит принцип определения статистической связи между параметрами разделения. В ряде случаев удается построить какое-либо статистическое распределение, описываемое аналитически. Тогда параметры этого распределения и являются критерием разделения.

**Физико-химические параметры** можно использовать в критериях, вывод которых связан с конкретными особенностями разделительных процессов. Критерии различия физико-химических свойств разделяемых материалов (смачиваемости, плотности, магнитной проницаемости, температуры плавления, кипения и др.), связанные с разделяемостью (обогащаемостью), необходимо рассматривать вместе с соответствующими процессами. Критерии совершенства разделения на каком-либо конкретном аппарате являются весьма существенными сами по себе или в комбинации с другими видами критериев.

При анализе обогащаемости угля широкое распространение получили критерии, вывод которых основан на кривых разделения Тромпа, представляющих функцию, определяющую изменение содержания ценного компонента во фракциях с различным составом сростков.

#### **Экономические критерии**

Экономические критерии разделения являются универсальной оценкой. Авторами многих работ показано, что единственно возможный подход к оптимизации производственных процессов — экономический. Недостатком его является наличие большого числа формул для экономической оценки.

Следует отметить, что большинство критериев оценивает процесс только по конечным продуктам и вычисление по ним стоимости промежуточных продуктов, подвергающихся дальнейшему обогащению, затруднительно.

Экономический подход отличается от всех других тем, что общая формула критерия должна учитывать как требования поставщика продукции (в рассматриваемом случае обогатительная фабрика), так и потребителя. В некоторых случаях это может быть осуществлено сравнительно просто, например, в рамках одного горно-металлургического комбината, в других случаях это весьма затруднительно, например, при производстве концентрата на экспорт. В общем случае универсальным методом учета свойств потребителя является наложение ограничений на свойства концентратов. Это могут быть ограничения типа равенств или неравенств, связывающие цены на концентраты с его качеством.

Почти все критерии сложны, требуют привлечения дополнительной информации и для оперативных расчетов непригодны.

Экономическая функция стоимости промежуточных продуктов в зависимости от их качества в ряде случаев может быть задана в приближенном виде на основе некоторых экономических или технологических соображений.

По аналогии с кривыми обогатимости, показывающими изменение качества концентрата при изменении его выхода в зависимости от состава сростков, может быть задана функция изменения стоимости продукта при изменении концентрации в нем ценного компонента. Общая эффективность процесса, вычисленная с помощью этой функции, может представлять собой экстремальную зависимость. Таким образом, оптимальный режим процесса может быть найден в соответствии с экономическим критерием разделения.

Наиболее просто задается такая функция вблизи кондиционных содержаний. В некоторых работах принята линейная экстраполяция, позволяющая приближенно оценивать экономическую эффективность процесса в узком интервале изменения концентрации ценного компонента в конечном продукте.

### 3. Применение методов прикладной кибернетики при проектировании АСУ

#### 3.1 "Черный ящик" и математические модели

Выше мы установили, что для проектирования систем управления необходима информация о взаимосвязи факторов процесса и принятого критерия, т.е. необходима математическая модель процесса.

Показано, что процессы обогащения достаточно сложны, зависят от многих разнообразных воздействий (факторов) и комбинаций (взаимодействий) этих факторов.

Для исследования такой сложной системы необходимо прибегнуть к некоторым упрощениям. Этот прием достаточно привычен для нас, так как, анализируя любую жизненную ситуацию, мы рассматриваем не все многообразные вопросы, связанные с ней, а только некоторые, наиболее существенные для нашего анализа. Иначе говоря, мы рассматриваем упрощенную модель.

До какой степени можно упростить модель при управлении процессом на фабрике? Естественно, это зависит от постановки нашей задачи. Сформулируем ее, например, следующим образом: обеспечить максимальную степень обогащения, используя флотацию с применением реагентов, например, ксантогената, сернистого натрия, извести и ксиленола. Иначе говоря, манипулируя расходами перечисленных реагентов, добавляемых в рудную пульпу, мы должны получить обогащенный концентрат и при этом выбрать из всех возможных манипуляций (входных воздействий) такую их комбинацию, которая обеспечит максимальную степень обогащения (выходной параметр).

Заметим, что при такой постановке задачи нас не интересует ни механизм действия реагентов на руду, ни взаимодействие реагентов между собой, ни поведение пенного слоя. Мы отвлеклись от всех этих сложностей, отгородив внутреннюю сущность процесса непрозрачными стенками, как бы поместив его в «черный ящик». Наша модель является исключительно простой: мы рассматриваем только воздействия на входе в «черный ящик» и смотрим, какой при этом получается выход (рис. 4.1). Другими словами исследователь, изменяя по определенному алгоритму входные параметры процесса, оценивает его реакцию (изменение выходного параметра) на эти воздействия.

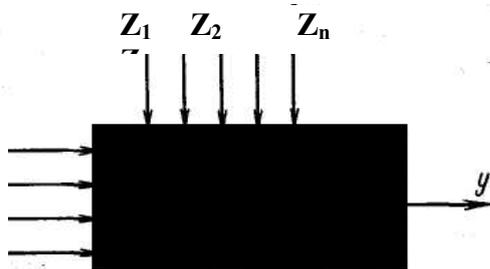


Рис. 4.1 - «Черный ящик»:  
 $X_1, \dots, X_n$  — регулируемые входные воздействия;  
 $Z_1, \dots, Z_n$  — нерегулируемые воздействия;  
 $y$  — выходной параметр

Далее с использованием соответствующего математического аппарата находится математическая модель, связывающая

принятый критерий эффективности процесса с входными воздействиями (факторами).

«Черный ящик» является простейшей моделью любой системы, внутренняя структура которой может быть совершенно недоступной для наблюдения. При этом в пределах поставленной нами задачи он по существу ведет себя совершенно так же, как и реальная система.

Нельзя сказать, что подобное моделирование является изобретением кибернетики. Мы манипулируем ручками настройки («входами») радиоприемника, который можно рассматривать как «черный ящик» с неизвестным нам внутренним устройством, пока не получим желаемый «выход» — чистоту и силу звука, программу передачи.

Смысл предлагаемой постановки задачи заключается в том, что кибернетика предлагает нам оптимальный план исследования «черного ящика». Этот план предусматривает не только достижение максимального значения выхода наиболее быстрым способом, но и получение математической модели процесса, являющейся исключительно компактным и удобным инструментом для исследования и управления реальным процессом. Во многих случаях модель позволяет также лучше понять внутреннее устройство «черного ящика», пользуясь физическими аналогиями и математическим анализом. Иногда «черный ящик» является вообще единственно возможным инструментом исследования, так как только в редких случаях удается «заглянуть» внутрь системы, не нарушая ее естественного состояния и хода процесса.

Таким образом, утилитарно-производственный подход, заложенный в идее «черного ящика» — получение максимального выхода при данном наборе входных воздействий без учета внутренней сущности процесса, на самом деле весьма эффективен и при теоретическом исследовании. Кроме того, любой теоретический вопрос может исследоваться методом «черного ящика».

Эффективность «черного ящика» как инструмента исследования определяется его колоссальным внутренним разнообразием. Классическим примером в этом смысле может служить «ящик Боумана», который имеет всего восемь входов, принимающих только по два значения, и один выход также с двумя состояниями. Это достаточно простая машина может моделировать  $2^{256}$  различных состояний, что всего в 200 раз меньше общего числа протонов и электронов во Вселенной. Этот же расчет показывает, насколько сложны исследуемые нами процессы, учитывая, что процесс, управляемый всего восьмью параметрами, встречается достаточно часто, причем эти параметры имеют гораздо большее число уровней, чем два.

Скорость достижения поставленной цели исследования существенно зависит от плана, т. е. последовательности опытов, в которых изменяются входные воздействия.

Подход к объекту исследования, как к кибернетическому «черному ящику», позволяет применить статистические методы планирования экстремальных экспериментов, которых мы рассмотрим ниже, для скорейшего нахождения оптимальных условий процесса и получения его математической модели.

В отличие от обычного логического анализа результатов экспериментов метод «черного ящика» предусматривает четкую формулировку выходного параметра — критерия оптимизации. Например, оптимизация извлечения совсем не то же самое, что оптимизация коэффициента селективности или качества концентрата. Для различных критериев оптимизации будут получаться различные модели, отличающиеся не только числовыми коэффициентами (что естественно, так как выходные параметры численно отличаются друг от друга), но и экстремальными точками, аналитической формой и т. д.

Обозначив значения выходного критерия оптимизации через  $y$ , а воздействующие параметры через  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , получим математическую модель процесса в виде:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

Если объект хорошо изучен, то на основании известных физических или химических законов составляются уравнения, которые и являются математической моделью этого объекта. Однако, для реальных обогатительных процессов этот подход нереализуем.

Для стохастических объектов типа «черный ящик» применяются экспериментальные методы. При этом используются либо данные отдельных измерений параметров объекта, либо (для непрерывных действующих процессов) записи входных и выходных переменных в условиях нормальной эксплуатации. Методы построения математических моделей объектов управления в условиях нормальной эксплуатации основаны на теории оптимальных в статистическом смысле систем. Получение математической модели в этом случае наглядно иллюстрируется рис. 4.2. Входная  $X$  и выходная  $y$  переменные объекта могут быть замерены. По результатам замеров находится уравнение связи между  $x$  и  $y^*$ . Задача состоит в том, чтобы значение  $y^*$ , получаемое по математической модели, было близко, к значению  $y$  на выходе реального объекта.



Рис. 4.2 – Схема получения модели объекта

Для получения математического описания объекта природа последнего не имеет принципиального значения. Должна быть установлена лишь та совокупность математических операций, которые преобразуют входную переменную  $x$  в выходную переменную  $y$ .

Под *математической моделью* любого процесса понимают совокупность соотношений (равенств и неравенств), достаточных для решения поставленной задачи, адекватных процессу и учитывающих физические и математические ограничения. В случае оптимизации всего производства нужно создавать его математическую модель. При этом математическая модель процесса, протекающего в отдельном аппарате, будет входить в общую модель как составная часть.

Применение математической модели дает возможность:

- ❖ выбрать оптимальный технологический режим процесса;
- ❖ сократить план исследовательских работ при разработке технологии производства;
- ❖ создать оптимальную схему автоматического управления процессом с передачей (там, где это целесообразно) функций управления вычислительным комплексам.

**Работы по автоматизации производственных процессов** связаны с решением ряда взаимосвязанных проблем, к которым относятся: методы построения математических моделей производственных процессов, разработка алгоритмов управления, методы получения, передачи и переработки информации, разработка критериев оптимизации, разработка структурных схем управления, выбор регуляторов и др.

В большинстве случаев построение математической модели производственного процесса занимает значительное место в общем комплексе работ по автоматизации управления. Особенно это относится к сложным производственным комплексам со значительным числом входных и выходных переменных, со сложными внешними и внутренними нелинейными взаимосвязями. Статистические методы получения математических моделей делают возможным описание процессов по результатам наблюдений в условиях нормальной эксплуатации.

### **3.2. Математическая статистика в исследованиях по управлению процессами обогащения**

Как показано выше, сложность процессов обогащения, предопределяет необходимость использования для их изучения «черный ящик» и математические модели. Наличие элементов неопределенности заставляет применить теорию вероятности и математическую статистику.

Математическая статистика в исследованиях по обогащению полезных ископаемых в последние годы получает все более широкое распространение.

Применение методов математической статистики для анализа технологических процессов и построения математических моделей связано с постановкой задачи создания систем автоматического управления. Статистический анализ в процессах обогащения применялся и ранее, особенно в расчетах по опробованию процесса. Однако только в последние годы наметилась тенденция использования математической статистики для получения количественных характеристик и количественной оценки влияния тех или иных факторов.

Отмеченная тенденция в значительной степени обусловлена развитием математической статистики в последние годы как математической дисциплины, тесно связанной с технической кибернетикой общим подходом к объекту исследования как к «черному ящику».

Другим существенным фактором в развитии математической статистики явилось создание в последнее десятилетие математической теории эксперимента

как новой и, в известной мере, самостоятельной области статистики. Теория эксперимента оказалась жизненно важной для исследования сложных многофакторных процессов в химии, биологии, металлургии и т. д..

Исследование процессов обогащения полезных ископаемых и управление ими также возможно на основе применения статистических методов. При этом возможно использование как широко известных традиционных методов статистического анализа, таких как дисперсионный, корреляционный, регрессионный, так и новых, возникших только в последние годы. К последним можно отнести в первую очередь методы статистического планирования экстремальных экспериментов, методы выявления значимых факторов, например случайный баланс. Весьма перспективными представляются некоторые кибернетические приемы, основанные на вероятностном подходе к анализу процесса, например распознавание образов, использование графов как дополнительного инструмента при корреляционном анализе, динамическое программирование и др.

Традиционным в исследованиях по обогащению полезных ископаемых является применение статистических методов и оценок для характеристики воспроизводимости экспериментов и, в частности, опробования. Вывод формул для подсчета минимального веса проб в зависимости от крупности материала основан на статистических критериях, связывающих распределение минеральных частиц в пробе (с учетом содержания ценного минерала) и допустимую ошибку опробования.

Применение математической статистики в лабораторных исследованиях процессов связано, прежде всего, с анализом экспериментального материала и компактным представлением полученных результатов. На практике возникает необходимость свести первоначальную массу данных к небольшому числу показателей, которые достаточно полно характеризуют свойства всей совокупности. В исследовательской работе часто приходится ограничиваться небольшим числом определений, которые представляют собой случайную выборку из генеральной совокупности.

Статистические параметры являются наиболее удобными для характеристики крупности материала, вкрапленности ценных компонентов, раскрытия минералов, распределения флотационных реагентов по поверхности частиц.

Математическая статистика позволяет определить, в какой степени свойства выборки отражают свойства генеральной совокупности, оценить параметры генеральной совокупности и установить для них доверительные интервалы даже по весьма малым выборкам.

Методы математической статистики весьма разнообразны и могут применяться при исследовании широкого круга вопросов.

*Дисперсионный анализ* применяется для оценки вклада в разброс (дисперсию) выходного параметра какого-либо фактора. Такая оценка может потребоваться при исследовании колеблемости данных, воспроизводимости экспериментов, определении доверительного интервала значений какой-либо величины или коэффициентов в уравнении, описывающем процесс. Дисперсионный анализ с многосторонней классификацией может служить для

оценки влияния различных факторов на отклонение исследуемого параметра от среднего значения.

В обогащении полезных ископаемых дисперсионный анализ нашел применение для оценки воспроизводимости химических анализов, лабораторных экспериментов, а в случае анализа промышленного продукта среднее квадратичное отклонение, например извлечения, служит мерой стабильности работы фабрики.

Близко к дисперсионному анализу примыкает *факторное планирование экспериментов*. Факторный анализ позволяет оценить вклад исследуемых факторов и их взаимодействий в среднее значение параметра, характеризующего процесс в целом, и найти математическую модель процесса.

*Корреляционный анализ* позволяет оценить тесноту связи различных параметров или факторов, влияющих на процесс. Этот метод широко распространен при исследовании промышленных процессов. При определении коэффициента корреляции, если он достаточно высок, можно получить информацию, позволяющую выбрать основные регулирующие воздействия на процесс, точки и методы измерения факторов, установить минимально необходимое количество измеряемых параметров. Если коэффициент линейной корреляции мал по абсолютной величине, то это свидетельствует о более сложной зависимости (не линейной) между измеряемыми параметрами или о существенном влиянии других факторов на данные параметры. В этом случае необходимо вычисление более сложной зависимости в виде нелинейного уравнения.

Получение таких уравнений методом наименьших квадратов составляет основу *регрессионного анализа*. Однако необходима осторожность при использовании регрессионного уравнения, в частности обязательна проверка адекватности модели и процесса.

Одним из бурно развивающихся направлений регрессионного анализа является *планирование экстремальных экспериментов*. Это направление включает: выбор основных воздействующих на процесс факторов методом случайного баланса, определение направления крутого восхождения (градиента) к экстремальному значению с помощью факторного плана или его дробных реплик, движение по градиенту, получение регрессионного уравнения с помощью плана более высокого порядка в экстремальной (почти стационарной) области. Методы планирования экспериментов находят все более широкое применение в лабораторных исследованиях на обогатимость. Существуют также методы планирования экстремальных промышленных экспериментов (эволюционное планирование и др.).

Весьма большое распространение получили статистические методы *определения статических и динамических характеристик* сложных недетерминированных процессов для их автоматизации. Выбор регуляторов и управляющих машин, основанный на таких статистических характеристиках процесса, осуществлен применительно к процессам флотации, измельчения, отсадки и т. д.

### 3.3. Математическое программирование экстремальных задач

В производственной практике и в жизни универсальным и общим является стремление максимально возможного приближения к поставленной цели наиболее быстрым способом, с наименьшими затратами.

Практика показывает, что большие затруднения вызывает даже однозначная формулировка цели в количественном выражении, так называемая целевая функция, или критерий эффективности. Учитывая, что мы часто одновременно стремимся к противоречивым целям, например к повышению извлечения в обогащении и снижению себестоимости переработки руды, попытаемся разобраться в этом сложном вопросе.

Пока предположим, что наша цель количественно определена, и мы хотим управлять процессом таким образом, чтобы он с точки зрения данной целевой функции протекал наилучшим образом.

Например, наша задача может формулироваться как достижение максимальной степени обогащения или минимальной себестоимости концентрата, т. е. экстремального значения целевой функции, аргументами которой являются режимные параметры процесса - производительность, качество руды, расходы реагентов и т. д. При этом необходимо считаться с тем, что управляющие воздействия могут изменяться лишь в определенных, ограниченных пределах. Кроме того, на систему могут быть наложены дополнительные ограничения: на значения параметров процесса, на сложность алгоритма управления, на объем используемой информации и др.

Оптимальное управление процессом может рассматриваться как принятие определенных решений, соответствующих изменениям ситуации. Принятие решения связано с выбором из множества всевозможных, допускаемых обстоятельствами, некоторого одного определенного решения. Чем большим числом вариантов мы располагаем, тем больше информации необходимо для их различия и тем более громоздким оказывается описание всей задачи. Очень часто условия задачи могут быть описаны не несколькими отдельными числами, а лишь целыми таблицами чисел.

В процессе принятия решения оперируют функцией, аргументами которой являются допустимые варианты решения, а значениями — числа, которые описывают меру достижения поставленной цели. Задача принятия решения сводится тем самым к нахождению максимального (или минимального) значения целевой функции, а также значений аргументов, при которых этот максимум достигается. Такое максимизирующее (минимизирующее) значение называется оптимальным. Количественным обоснованием принятия решения в кибернетике занимается дисциплина, называемая исследованием операций.

Отыскание оптимального решения в большинстве случаев представляет собой весьма трудоемкую задачу, и практическое применение этих методов, как правило, связано с необходимостью в большом количестве вычислений.

Часто задача оптимального управления состоит в том, чтобы выработать оптимальную последовательность решений для какого-либо многошагового процесса. С такого рода задачами мы сталкиваемся, например, при

планировании капиталовложений в предприятия на несколько лет, если мы стремимся выбрать такую последовательность капиталовложений на каждый год, чтобы за определенный период получить максимальный эффект для народного хозяйства.

Подход к выбору пути решения задач управления образно отобразил в своей работе Я. Цыпкин: «В развитии теории автоматического управления можно выделить три наиболее характерных периода, которые можно назвать периодами детерминизма, стохастичности и адаптивности.

В счастливые времена детерминизма как уравнения, описывающие состояние управляемых объектов, так и внешние воздействия, (задающие и возмущающие) предполагались известными. Такая полная определенность позволяла широко использовать классический аналитический аппарат для решения разнообразных проблем теории управления. Особенно это относится к линейным задачам. Затруднения возникли, как только появилась необходимость в учете нелинейных факторов. Но и в области нелинейных задач, несмотря на отсутствие общих методов, были получены существенные результаты, как по анализу, так и по синтезу автоматических систем.

Менее счастливое время наступило во второй период — период стохастичности, когда в связи с учетом реальных условий работы, автоматических систем было установлено, что внешние воздействия задающие, а особенно возмущающие, непрерывно изменяются во времени и не могут быть однозначно определены. Часто это относится и к коэффициентам уравнений управляемых объектов.

Поэтому возникла необходимость в привлечении иных подходов, учитывающих вероятностный характер внешних воздействий и уравнений. Эти подходы основаны на знании статистических характеристик случайных функций (которые тем или иным путем должны быть предварительно определены) и широко используют аналитические методы...

В современных сложных автоматических системах, работающих в самых разнообразных условиях, не только заранее неизвестны уравнения управляемых объектов и внешние воздействия (либо их статистические характеристики), но по различным причинам их нельзя предварительно определить. Иначе говоря, мы сталкиваемся с большей или меньшей начальной неопределенностью. Все это хотя и затрудняет управление такими объектами, однако не делает это управление в принципе невозможным и свидетельствует лишь о наступлении нового (третьего) периода в теории управления - периода адаптивности. Возможность управления объектами при неполной или даже весьма малой априорной информации основана на применении адаптации и обучения в автоматических системах, которые уменьшают первоначальную неопределенность на основе использования информации, получаемой в течение процесса управления.

Если число всех допустимых решений невелико, то оптимальное решение можно обнаружить методом последовательного перебора вариантов, вычисляя значения целевой функции для всех значений аргумента и выбирая максимальное из этих значений. При возрастании числа вариантов на помощь

могут прийти вычислительные машины, однако и при их использовании желательно найти достаточно эффективные алгоритмы целенаправленного перебора решений.

Если решение описывается числом или системой нескольких чисел, а целевая функция обладает «достаточно хорошими» свойствами, то для нахождения ее максимума можно воспользоваться приемами дифференциального исчисления. Эта возможность быстро утрачивается с увеличением числа аргументов целевой функции и практически пропадает, если функция недифференцируема (если на соответствующей ей поверхности имеются ребра). Она вовсе неприменима, если множество допустимых решений оказывается не непрерывным, а дискретным. Во всех этих случаях необходима разработка нового математического аппарата, специально приспособленного для решения такого рода задач. Этот аппарат называют математическим программированием.

В современной теории управления получено много результатов в области детерминированного оптимального управления. Были развиты различные аналитические методы, такие как вариационное исчисление, динамическое программирование, принцип максимума Понтрягина и т. д., и вычислительные методы, такие как метод градиента. Эти методы дают возможность исследовать нелинейные системы управления с переменными параметрами при ограничениях в форме неравенств.

Важно подчеркнуть, что математическое программирование не связано с необходимостью описания условий задачи в аналитическом, формульном виде и поэтому может охватить значительно более широкий круг задач, чем те методы, при помощи которых пытаются получить решение в аналитической форме. Алгоритмическая форма решения экстремальных задач дает возможность использовать средства современной вычислительной техники.

#### **4. Основные направления использования статистических методов при разработке принципа управления процессами обогащения**

Ранее было показано, что для эффективного управления процессами обогащения необходимо выявить оптимальный (рациональный) технологический режим процесса, характеризующегося соответствующим критерием эффективности и получить математическую модель управляемого процесса.

Для решения этих задач целесообразно применять статистические методы, общая характеристика рассмотрена в разделе 3.2. Наиболее результативный метод – активный эксперимент, основанный на факторном планировании. Ниже предложены некоторые рекомендации по организации и проведению экспериментальных работ, а также статистические оценки экспериментальных данных.

##### **4.1. Техника постановки экспериментов по исследованию процесса**

При исследованиях процессов обогащения в лабораторных условиях предварительно необходимо:

1. Обосновать критерий эффективности исследуемого процесса.
2. Принять и обосновать управляемые факторы процесса.
3. Определить методы контроля параметров.
4. Разработать методику и план (последовательность проведения) экспериментов.
5. Разработать схему и методику опробования.

*Критерии эффективности процессов.* Подробно критерии рассмотрены в разделе 2.3. Здесь же напомним, что выбор критерия - сложная и важная задача, во многом определяющая результативность исследований.

Критерий эффективности, оптимизации, функция цели, выходной параметр - все это формализованный смысл наших стремлений и степень понимания, что хорошо, а что плохо. Правильный выбор критерия предопределяет успех будущих исследований.

Барский Л.А. сформулировал требования к критериям эффективности процесса:

- а) критерий должен быть численным и однозначным;
- б) критерий должен учитывать конечную цель производства;
- в) критерий должен быть максимально прост и, по возможности, иметь физический смысл.

В настоящее время существует более 100 критериев и ни один из них не удовлетворяет сформулированным требованиям.

Обычно при исследованиях экстремальных процессов (статическая характеристика процесса имеет глобальный экстремум) в качестве критерия принимается два показателя. Один из них - основной, по которому отыскивается рациональный режим (экстремум), и дополнительный, который учитывает, как

правило, какие-либо ограничения. Например, при исследовании процесса флотации угля, целевой функцией можно принять условие:

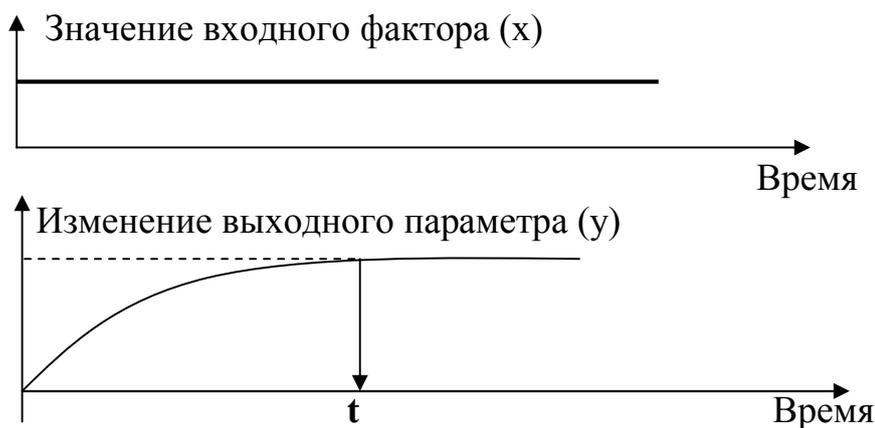
$$A_{отх} \longrightarrow \max$$

$$A_{кт} < 8\% \text{ (любое допустимое значение).}$$

*Обоснование входных параметров.* При изучении процесса следует выбрать входные факторы (параметры), определяющие режим процесса. При всей многочисленности факторов необходимо стремиться к минимальному их числу. При этом нужно руководствоваться требованиями к входным параметрам:

- ✓ входной параметр (X) должен существенно влиять на принятый критерий эффективности процесса (Y);
- ✓ параметр должен быть управляемым и контролируемым;
- ✓ принятые входные параметры должны быть независимы друг от друга.

*Опробование продуктов операций.* При экспериментах на оборудовании, работающему в непрерывном режиме, необходимо определить *продолжительность переходного процесса* после изменения значения любого входного фактора. Взятие проб, снятие показаний можно производить только в установившемся режиме (рисунок).



Опробование следует производить после истечения времени  $t$ .

## 4.2. Статистические оценки результатов экспериментов

*Доверительные интервалы.* Все результаты экспериментов содержат ошибки опытов. Ошибки классифицируются на систематические, случайные и промахи (особо крупные случайные ошибки). Случайные ошибки фактора (X) оцениваются с помощью среднеквадратичного отклонения  $S_x$ . Заметим, что  $S^2$  именуется дисперсией фактора.

Любой результат опыта должен характеризоваться двумя показателями – доверительным интервалом и доверительной вероятностью (P).

В общем виде доверительный интервал имеет вид:  $X_{уст} = \bar{X} \pm \Delta X$ ,

где  $X_{ист}$  – истинное значение величины;

$\Delta X$  – погрешность измерения.

В зависимости от объема выборки (количества дублирующих опытов) для определения доверительных интервалов применяют соответствующие законы распределения.

Условно принято считать выборку малой, если число опытов меньше 30.

**Доверительный интервал для большой выборки.** Основан на законе Гаусса. ( $n > 30$ ).

$$X_{уст} = \bar{X} \pm 1S_x \quad \text{- при доверительной вероятности } P=0.68;$$

$$X_{уст} = \bar{X} \pm 2S_x \quad \text{- при доверительной вероятности } P=0.95;$$

$$X_{уст} = \bar{X} \pm 3S_x \quad \text{- при доверительной вероятности } P=0.99.$$

где  $S_x$ - среднеквадратичная ошибка среднего;

$\bar{X}$  - математическое ожидание (среднее);

$X_{ист}$ - истинное значение фактора.

**Доверительный интервал для малой выборки.** Основан на распределении Стьюдента ( $t$ ), ( $n < 30$ .)

$$X_{уст} = \bar{X} \pm tS_x \quad \text{или} \quad X_{уст} = \bar{X} \pm t \frac{S_i}{\sqrt{n}},$$

где  $S_i$  - среднеквадратичная ошибка единичного измерения

$t$  - функция от  $\{P; f\}$ ,  $f = n - 1$  ( $f$  - число степеней свободы). Значение критерия Стьюдента ( $t$ ) находят из таблиц.

Доверительный интервал значительно снижается при увеличении числа опытов  $n$ , не только из-за знаменателя ( $n$ ) но и в большей мере за счет уменьшения значения  $t$  при увеличении  $n$ .

Например:

При  $n = 2$  и  $P = 0.95$ ,  $t = 12,1$ , при  $n = 3$ ,  $t = 4,3$ .

Обычно при технических исследованиях принимают доверительный интервал при доверительной вероятности  $P = 0.95$ .

### **Проверка статистических гипотез.**

При экспериментировании могут возникнуть следующие вопросы:

- ❖ подчиняется ли наблюдаемое значение нормальному закону распределения;
- ❖ существенно ли различие в средних двух совокупностей (или двух выборок);
- ❖ существуют ли различия между сравниваемыми дисперсиями;
- ❖ адекватна ли реальному процессу полученная математическая модель;
- ❖ значимы ли коэффициенты при факторах в модели процесса.

Все эти вопросы в исследованиях называют гипотезами.

Проверка гипотез осуществляется с помощью соответствующих критериев и с использованием "нулевой" гипотезы. Это - гипотеза об отсутствии различия в сравниваемых параметрах.

Рассмотрим проверку некоторых гипотез.

### ***Проверка гипотезы о равенстве средних.***

Для проверки данной гипотезы используется критерий Стьюдента. Применять данный критерий можно в тех случаях, когда объемы сравниваемых выборок равны.

$$n_1 = n_2 = n.$$

Последовательность проверки:

1. Определяется расчетное значение критерия Стьюдента.

$$t_{\text{рас}} = (\underline{x}_1 - \underline{x}_2) / (S^2_{\underline{x}_1} + S^2_{\underline{x}_2}),$$

где  $x_i$  - сравниваемые средние;

$S^2_{\underline{x}_i}$  - дисперсии среднего

2. По таблице определяем :

$$t_{\text{таб}} \{P; f = 2(n-1)\}$$

3. Вывод:

Если  $t_{\text{таб}} > t_{\text{рас}}$  - принимается  $H_0$  – гипотеза, т.е. различий между  $\underline{x}_1$  и  $\underline{x}_2$  нет.

***Гипотеза о равенстве дисперсий.*** Гипотеза лежит в основе проверки адекватности полученной модели.

1. Сравнение двух дисперсий.

Для сравнения двух дисперсий ( $S^2_{1}; S^2_{2}$ ) применяется критерий Фишера "F"

$$F_{\text{рас}} = S^2_{1} / S^2_{2} > 1.$$

По таблице определяем  $F_{\text{таб}} \{P; f_1; f_2\}$ .

Если  $F_{\text{таб}} > F_{\text{рас}}$  - принимается  $H_0$  – гипотеза, которая гласит, что с вероятностью  $P$  различие между сравниваемыми дисперсиями отсутствует.

### **4.3. Планирование экстремальных экспериментов**

#### *Терминология*

Большинство исследовательских задач состоят в поиске значений входных параметров, определяющих экстремум или наибольшее значение выходной функции (критерия эффективности).

Окрестность экстремальной точки называется "*почти стационарной областью*". Координатное пространство, ограниченное факторами  $x_i$ , именуется *факторным пространством*.

Уравнение, связывающее критерий эффективности процесса с входными факторами, часто называют "*функцией отклика*" (показывает по какой закономерности "откликается" исследуемый процесс на входные воздействия.)

Геометрический образ функции отклика именуют "*поверхностью отклика*".

В случае, если число факторов больше двух, поверхность отклика называется *гиперповерхностью*.

*Статистический метод поиска экстремума* основан на факторном планировании эксперимента, разработанном Р. Фишером, и последующем крутым восхождении.

Факторное планирование основано на проведении небольшой серии опытов в соответствии с ортогональной матрицей в любой части поверхности отклика. Математическая обработка результатов позволяет получить уравнение аппроксимирующей плоскости, при этом значение коэффициентов уравнения и их знаки позволяют определить направление движения к экстремуму. Используя полученное уравнение, с помощью крутого восхождения (метод Бокса и Уилсона) находят координаты экстремальной области.

### 4.3.1. Полный факторный эксперимент

План экспериментов формально представляется матрицей, где каждая строка соответствует одному опыту и определяет его условия. При реализации матрицы каждый фактор может принимать только два значения - "верхнее" и "нижнее". Знаки "+1" или "-1" обозначают, на каком уровне находятся значения факторов (" +1" - на верхнем уровне, "-1" - на нижнем).

Если в матрице перебраны все возможные комбинации значений факторов, то матрица представляет полный факторный эксперимент «ПФЭ».

Например: матрица полного факторного эксперимента при двух факторах имеет вид:

Таблица 4.1

Факторы	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	Y
1	-1	-1	y <sub>1</sub>
2	+1	-1	y <sub>2</sub>
3	-1	+1	y <sub>3</sub>
4	+1	+1	y <sub>4</sub>

Если принять N - число строк в матрице, k - число факторов, то полный факторный эксперимент можно кратко обозначить ПФЭ 2<sup>k</sup>. Тогда N=2<sup>k</sup>.

При заполнении матрицы можно руководствоваться правилом: частота смены знака последующего фактора в два раза меньше предыдущего.

Перед экспериментированием (реализацией матрицы планирования) задаются основными уровнями факторов (в натуральных единицах: %, г/л, кг/т и т.д.) и шагами варьирования для каждого фактора. Основной уровень обозначают: X<sub>oi</sub>, шаг варьирования - λ<sub>i</sub>

Тогда для матрицы (табл. 4.1) условия проведения первого и второго опытов (значения факторов):

$$\begin{aligned} X_1 &= X_{o1} - \lambda_1 & X_2 &= X_{o2} - \lambda_2 \\ X_1 &= X_{o1} + \lambda_1 & X_2 &= X_{o2} - \lambda_2 \end{aligned}$$

и т.д.

Ниже приведена матрица полного факторного эксперимента для трех факторов. Число строк матрицы -  $N=2^3 = 8$ . В матрице условно не показаны "1", но они там незримо присутствуют.

Таблица 4.2

Факторы	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>
1	-	-	-
2	+	-	-
3	-	+	-
4	+	+	-
5	-	-	+
6	+	-	+
7	-	+	+
8	+	+	+

Использование полного факторного эксперимента не всегда целесообразно, т.к. с одной стороны необходимо большое число опытов, с другой стороны на первом этапе исследования не нужна высокая точность уравнений аппроксимирующей поверхности. Поэтому чаще используют дробный факторный эксперимент «ДФЭ».

#### 4.3.2. Дробный факторный эксперимент

Матрицу ПФЭ  $2^2$  можно дополнить столбцом "взаимодействия" факторов (табл. 4.3), т.е. произведением факторов  $X_1X_2$ . При этом содержимое столбца определяется как произведение столбца  $X_1$  на  $X_2$ . Например, для первой строки:  $(-1)(-1)=+1$ .

Табл. 4. 3

Факторы	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>	Y
1	-	-	+	y <sub>1</sub>
2	+	-	-	y <sub>2</sub>
3	-	+	-	y <sub>3</sub>
4	+	+	+	y <sub>4</sub>
	b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>	b <sub>12</sub>	

Математический аппарат позволяет определить коэффициенты  $b_1$  и  $b_2$ , используя содержимое столбцов  $x_1$  и  $x_2$ . Если добавить третий столбец с произведением факторов  $x_1x_2$ , то можно найти коэффициент  $b_{12}$ . Таким образом, полная математическая модель имеет вид (1).

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_{12} \quad (1)$$

Матрица дробного факторного эксперимента образуется на основе матрицы полного факторного эксперимента путем замены какого либо произведения факторов на новый линейный фактор.

Например, заменяя произведение факторов  $X_1X_2$  новым фактором  $X_3$ , получим матрицу для трех факторов, имеющую всего 4 строки.

Табл. 4.4

Факторы	$X_1$	$X_2$	$X_3$	Y
1	-	-	+	$y_1$
2	+	-	-	$y_2$
3	-	+	-	$y_3$
4	+	+	+	$y_4$
Коэффициенты	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_0$

В результате обработки матрицы можно получить уравнение (2):

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 \quad (2)$$

Замена произведения факторов на новые линейные члены факторов будет возможна, если степень влияния заменяемого произведения факторов на процесс значительно меньше степени влияния нового вводимого фактора, а это всегда имеет место, когда мы находимся вдали от экстремальной области.

Таким образом, из матрицы ПФЭ  $2^3$  можно получить ДФЭ для 4, 5, 6, 7 факторов, осуществлением замены, например  $X_4 = X_1X_2X_3$ ;  $X_5 = X_1X_2$  и т.д.

Если обозначить  $k$  – число всех факторов,  $q$  – число линейных факторов, введенных в матрицу путем замены произведений, то дробный факторный эксперимент можно обозначить в общем виде как ДФЭ  $2^{k-q}$ .

Например, матрицу (табл.4.4) можно представлять в виде ДФЭ  $2^{4-1}$ .

Математический аппарат для определения коэффициентов математической модели ( $b_1; b_2; \dots b_n$ ) весьма прост (см. [5]).

### 4.3.3. Экспериментальный поиск экстремума функции отклика

Наименование данного подраздела можно раскрыть, как поиск значений всех входных факторов, которые обеспечивают максимальное (или минимальное) значение выходного параметра процесса – принятого критерия процесса.

Эти данные будут необходимы для установки задания в локальные системы регулирования технологических параметров.

Поиск экстремума может осуществляться несколькими способами, например, методом крутого восхождения или симплекс-методом.

### ***Крутое восхождение. (Метод Бокса – Уилсона).***

После получения математической модели и проверки ее на адекватность, можно приступить к отысканию оптимальной области путем движения по градиенту (крутое восхождение).

Идея метода следующая.

Анализ полученной модели позволяет определить, в каком направлении следует изменять факторы, чтобы увеличить значение оптимизирующего параметра.

Для движения по градиенту необходимо изменять факторы пропорционально их коэффициенту регрессии и в ту сторону, в которую указывает знак коэффициента. Заметим, что движение следует начинать из центра эксперимента (основного уровня факторов).

Расчет составляющих градиента производится следующим образом.

1. Вычисляется произведение всех коэффициентов модели на интервалы варьирования  $\lambda_i b_i$ .
2. Если эти произведения реальны для осуществления в качестве шагов варьирования, то они принимаются за новые шаги крутого восхождения.
3. Если какой-либо шаг выходит за границы области существования факторов, то тот шаг уменьшается до осуществимого  $\lambda_{ко}$ , и определяется вспомогательный коэффициент  $\Delta = \lambda_{ко} / \lambda_k b_k$ , где  $\lambda_k$  – старый шаг варьирования k- того фактора,  $b_k$  - коэффициент в модели при данном факторе.
4. Новые шаги крутого восхождения остальных факторов определяются по выражению:  $\lambda_{jкв} = \Delta \lambda_j b_j$

Далее проводится экспериментальный поиск экстремума функции. При этом значения каждого фактора в последующем опыте (шаге) изменяется на величину шага крутого восхождения ( $\lambda_{jкв}$ ) с учетом его знака. Знак нового шага крутого восхождения совпадает со знаком при соответствующем коэффициенте модели, если ищется максимум функции, и принимает противоположное значение, если нас интересует минимум функции.

Более подробно с методом крутого восхождения можно ознакомиться в [5].

### ***Поиск рациональных режимов симплекс-методом***

Одним из простых и надежных экспериментальных методов определения экстремума функции является симплексный, относящийся к адаптационным методам поиска экстремума.

Сущность метода заключается в том, что в факторном пространстве строится правильный симплекс, вершины которого соответствуют условиям опытов (значениям факторов). Координаты вершин симплекса и образуют план экспериментов.

При последовательной замене опытов (вершин) с худшими результатами на новые вершины (зеркальные точки), образующие новый симплекс, осуществляется перемещение его по поверхности отклика процесса в направлении максимального значения.

Под правильным симплексом понимают совокупность  $n+1$  равноудаленных друг от друга точек в  $n$ - мерном пространстве. Для  $n = 2$  - это равносторонний треугольник, для  $n = 3$  (три фактора) - это правильная треугольная пирамида (тетраэдр). Координаты вершин правильных симплексов, с центром в начале координат, задаются матрицей в  $n$ - мерном пространстве и легко рассчитываются. В таблице 4.5 приведен фрагмент данной матрицы максимум для 5-ти факторов. Здесь каждая строка соответствует одному из опытов серии, а в столбцах указаны значения факторов в относительном (закодированном) виде.

Таблица 4.5

№ опыта	Факторы				
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$
1	0,5	0,289	0,204	0,158	0,129
2	-0,5	0,289	0,204	0,158	0,129
3	0	-0,578	0,204	0,158	0,129
4	0	0	-0,612	0,158	0,129

Таблица может быть продолжена вправо и вниз. Для двух факторного процесса используют три строчки таблицы, для трехфакторного - четыре и т.д.

На рис. 4.1 иллюстрируется движение правильного симплекса к экстремуму поверхности отклика, представленной линиями равного значения критерия эффективности двухфакторного процесса (факторы  $X_1$  и  $X_2$ ).

После проведения опытов в вершинах 1, 2 и 3 худшим оказался опыт 1. Эта вершина заменяется новой (зеркальной) - 4, где ставится новый опыт. Далее сопоставляются опыты в вершинах 2, 3 и 4. Худший результат (точка 2) заменяют новой - вершиной 5, где проводится следующий эксперимент и т.д.

Значения факторов в исходном симплексе рассчитывают по формуле:

$$X_{ji} = X_{J0} + r_{ji} \lambda_j \quad (4.1)$$

где.  $X_{ji}$  - значение фактора в абсолютном масштабе;

$X_{J0}$  - основной уровень фактора;

$r_{ji}$  - значение элементов матрицы (табл. 4.5);

$\lambda_j$  значения шага варьирования фактора;

$J$  - номер фактора;

$i$  - номер опыта.

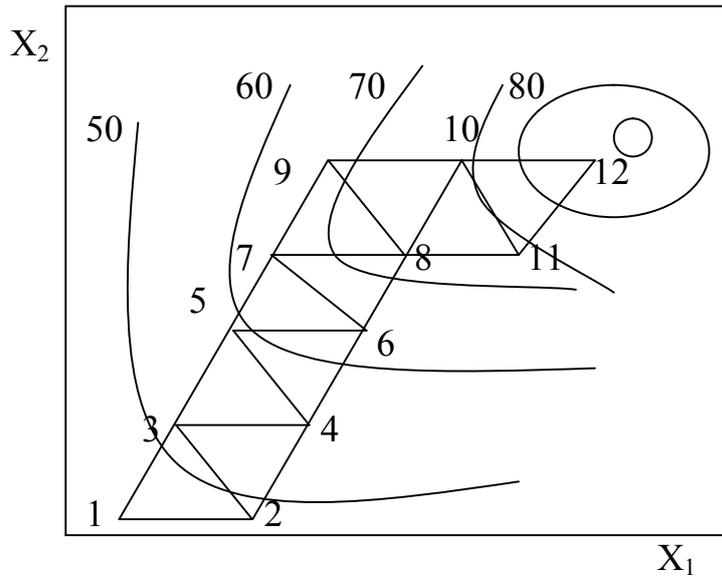


Рис. 4.1- Схема движения симплекса к экстремуму.

Значения факторов в зеркальной (новой) точке определяется по выражению:

$$X_{jn} = (2/n) \sum X_{ji} - X_{jз}, \quad (4.2)$$

$X_{jn}$  - новое значение фактора;

$X_{jз}$  - значение фактора в заменяемой точке;

$n$  - число факторов.

Следует отметить, что в сумму  $\sum X_{ji}$  значение фактора для заменяемого опыта не входит.

Таким образом, последовательность движения к экстремуму с помощью симплексного метода водится к следующему:

1. Составить исходную матрицу, задаться основными уровнями факторов, шагами варьирования и рассчитать значения факторов в вершинах исходного симплекса по выражению (4.1).
2. Реализовать условия первого (исходного) симплекса. Определить опыт с худшим результатом и по формуле (4.2) найти значение факторов в новой вершине и провести в ней опыт.
3. Смена условий и постановка новых опытов осуществляется до тех пор, пока значение хотя бы одной координаты факторов изменяются в одном направлении. Если значения факторов начнут колебаться около некоторого уровня (симплекс закручивается), опыты прекращаются.
4. Если при замены худшего опыта получается вновь худший результат, возвращаются к предыдущему симплексу и заменяют условия следующего плохого опыта.

*Пример.*

С целью изучения метода используем понятие "условного" объекта, который задается математической моделью (функцией 4.3).

$$Y=6+18X_1 - X_1^2 +40X_2 -2X_2^2 \quad (4.3)$$

Требуется найти экстремум функции симплекс-методом. Модель будем использовать для определения критерия  $Y$  при разных значениях факторов  $X_i$ .

Допустим, что априори приняты основные уровни факторов и шаги варьирования:

$$X_{1,0}=6.0; \quad X_{2,0}=4.0; \quad \lambda_1=1.0; \quad \lambda_2=2.0.$$

План экспериментов и результаты "опытов" представлены в таблице 4.6

Последовательность поиска следующая. Обозначим исходный симплекс через ABC, где точки A.B.C - его вершины, координаты которых определяют условия опытов. Значения факторов в закодированном виде приняты из таблицы 4.5 и занесены в столбцы 4 и 6 табл. 4.6. Абсолютные значения факторов определены по формуле 4.1. Например, условия первого опыта (вершина "A"):

$$\begin{aligned} X_{11} &= X_{1,0} + r_{11} \lambda_1 = 6 + 0.5 * 1 = 6.5 \\ X_{21} &= X_{2,0} + r_{21} \lambda_2 = 4 + 0.289 * 2 = 4.578 \end{aligned}$$

Аналогично для второго и третьего опытов:

$$\begin{aligned} X_{12} &= 6 - 0.5 * 1 = 5.5 \\ X_{22} &= 4 + 0.289 * 2 = 4.578 \\ X_{13} &= 6 + 0 * 1 = 6.0 \\ X_{23} &= 4 - 0.578 * 2 = 2.844 \end{aligned}$$

Данные значения факторов внесены в столбцы 5 и 7 соответствующих строк таблицы 4.6. Результаты "опытов", т.е. расчетов по модели 4.3 при найденных значениях факторов представлены в столбце 8. Анализ результатов реализации первого симплекса показывает, что худший результат получен в вершине C. Заменяем данный опыт новой точкой  $C_1$ , координаты которой определяем по формуле 4.2.

$$\begin{aligned} X_{1,4} &= (2/2)(6.5+5.5) - 6.0 = 6.0 \\ X_{2,4} &= (2/2)(4.578+4.578) - 2.844 = 6.312 \end{aligned}$$

Таблица 4.6

№ оп-та	Исх. симплекс	Вер- шина	X <sub>1</sub>		X <sub>2</sub>		Выход Y
			код	абс	код	абс	
1	2	3	4	5	6	7	8
1	ABC	A	0,5	6,5	0,289	4,578	220
2	ABC	B	-0,5	5,5	0,289	4,578	214
3	ABC	C	0	6,0	-0,578	2,844	185
4	ABC	C <sub>1</sub>	-	6,0	-	6,312	254
5	ABC <sub>1</sub>	B <sub>1</sub>	-	7,0	-	6,312	259
6	AB <sub>1</sub> C <sub>1</sub>	A <sub>1</sub>	-	6,5	-	8,046	273
7	A <sub>1</sub> B <sub>1</sub> C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	-	7,5	-	8,046	276
8	A <sub>1</sub> B <sub>1</sub> C <sub>2</sub>	B <sub>2</sub>	-	7,0	-	9,68	282
9	A <sub>1</sub> B <sub>2</sub> C <sub>2</sub>	A <sub>2</sub>	-	8,0	-	9,68	285
10	A <sub>2</sub> B <sub>2</sub> C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	-	7,5	-	11,314	284
11	A <sub>2</sub> B <sub>2</sub> C <sub>3</sub>	B <sub>3</sub>	-	8,5	-	11,314	286
12	A <sub>2</sub> B <sub>3</sub> C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	-	9,0	-	9,68	286,6
13	A <sub>2</sub> B <sub>3</sub> C <sub>4</sub>	A <sub>3</sub>	-	9,5	-	11,314	286

Результат опыта в вершине C<sub>1</sub>: Y=254. Сравнивая результаты в вершинах A, B и C<sub>1</sub> отмечаем худшее значение критерия в вершине B. Аналогично заменяем, достраивая новый симплекс. Подобное движение симплекса осуществлено до 13 опыта. Видно, что прироста функции Y практически нет. Можно заключить, что симплекс достиг экстремальной области. Продолжение поиска приводит к "вращению" симплекса. Принимаем координаты максимума:

$$X_1=9,0; \quad X_2=9.68; \quad \text{при этом } Y=286.6.$$

Если исследовать исходную модель на максимум, например, с помощью частных производных, то получим истинные координаты экстремума, мало отличающиеся от найденных симплекс-методом:

$$X_1=9,0; \quad X_2=10.0; \quad Y=287.$$

Некоторое расхождение в результатах связано с конечными размерами симплекса, если принять его меньшим (снизить шаги варьирования), то точность повысится.

#### 4.3.4. Нахождение математической модели экстремальной области процесса

После определения координат экстремальной области функции отклика следует найти ее математическое описание, что необходимо для разработки алгоритма автоматического управления процессом.

В большинстве случаев экстремальную область можно описать полиномами второго порядка.

Рассмотренное ранее факторное планирование типа ПФЭ  $2^n$  не позволяет оценить коэффициенты при квадратичных членах модели. Нужно использовать планирование типа  $3^n$ , но оно сложно и требует большого числа опытов.

Для решения поставленной задачи можно использовать несколько методов планирования экспериментов - ортогональное центрально-композиционное, ротатабельное центрально-композиционное и пр. Последнее предпочтительнее, так как позволяет получить одинаковую точность модели во всех направлениях. В основе этих методов лежит факторное планирование типа ПФЭ  $2^n$ , матрица которого дополняется, так называемыми, “звездными точками” ( $\alpha$ ) и нулевыми (центральными) точками. Метод позволяет получить модель в виде:

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i X_i + \sum_{i=1}^n b_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^n b_{ii} X_i^2,$$

где  $b_0$  – свободный член;

$b_i$  – коэффициенты при линейных членах;

$b_{ij}$  – коэффициенты при взаимодействиях;

$b_{ii}$  – коэффициенты при квадратичных членах модели;

$X_i$  – факторы.

Новый план экспериментов разбивается как бы на 2 части, первая из которых (ПФЭ) позволяет найти коэффициенты  $b_0$ ,  $b_j$  и  $b_{ji}$ , вторая – при квадратичных членах. Характеристика ротатабельного центрально-композиционного планирования приведена в таблице 4.7.

Величина плеча звездных точек рассчитывается по выражению:

$$\alpha = 2^{n/4}, \text{ где } n \text{ – число факторов.}$$

Центральный ротатабельный композиционный план второго порядка для трех факторов приведен в таблице 4.8.

Табл. 4.7

Число факторов	Число точек				$\alpha$
	ПФЭ	звездных	центральных	общее	
2	4	4	5	13	1,414
3	8	6	6	20	1,682
4	16	8	7	31	2,000
5	32	10	10	52	2,378

Таблица 4.8 - Ротатабельный центрально-композиционный план для трех факторов

Матрица планирования			Матрица вычисления					
$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_1^2$	$X_2^2$	$X_3^2$	$X_1X_2$	$X_1X_3$	$X_2X_3$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1
+1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	1
-1	+1	-1	1	1	1	-1	1	-1
+1	+1	-1	1	1	1	1	-1	-1
-1	-1	+1	1	1	1	1	-1	-1
+1	-1	+1	1	1	1	-1	1	-1
-1	+1	+1	1	1	1	-1	-1	1
+1	+1	+1	1	1	1	1	1	1
-1,682	0	0	2,828	0	0	0	0	0
+1,682	0	0	2,828	0	0	0	0	0
0	-1,682	0	0	2,828	0	0	0	0
0	+1,682	0	0	2,828	0	0	0	0
0	0	-1,682	0	0	2,828	0	0	0
0	0	+1,682	0	0	2,828	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0

В первой части матрицы представлен план ПФЭ  $2^3$ , во второй – звездные точки и в третьей части – 0 центральные точки.

Расчет коэффициентов модели можно производить по методике, изложенной в [2]. Однако рутинных вычислений можно избежать, если использовать ПЭВМ и статистические программы, например, Statgraphics Plus, которая содержит модуль планирования экспериментов (Design of Experiment) [6].

## 5. Анализ влияния входных факторов и возмущений на основные обогатительные операции и выбор каналов управления

### 5.1. Гравитационные процессы обогащения

#### 5.1.1. Отсадочные машины с роторным разгрузчиком

Рассмотрим управление отсадочной машиной с роторным разгрузчиком для обогащения угля.

Отсадочная машина – достаточно сложный объект управления. Основное возмущение на процесс – фракционный состав исходного. Если условно представить, что исходный уголь содержит 3 фракции (концентрат, промпродукт и породу с выходами  $\gamma_k, \gamma_{пп}, \gamma_{п}$ ), то система управления отсадочной машиной должна обеспечить, кроме рационального гидродинамического режима работы машины, выгрузку породы в количестве  $G_{п} = G\gamma_{п}/100$  (т/ч) и промпродукта –  $G_{пп} = G\gamma_{пп}/100$  (т/ч), где  $G$  – нагрузка на машину. Следовательно, нужно поддерживать указанные производительности роторных разгрузчиков в соответствующих отделениях машины.

Для реализации такого алгоритма следует обеспечить **оперативный контроль** нагрузки на машину ( $G$ ) и содержание товарных фракций в исходном ( $\gamma_{пп}, \gamma_{п}$ ). В настоящее время способ надежного автоматического контроля фракционного состава углей отсутствует. Поэтому управление отсадочной машиной производится по иному принципу.

Выполним факторный анализ процесса отсадки.

Отсадочная машина характеризуется большим количеством возможных управляющих воздействий (рис. 5.1). К ним относятся нагрузка ( $G$ ), расход транспортной и подситной воды ( $Q_{т}, Q_{п}$ ), расход воздуха ( $Q_{в}$ ), частота вращения роторных разгрузчиков ( $w_p$ ), частота и амплитуда пульсации постели ( $f_{п}, A_n$ ). Для автоматического управления важно выбрать те из них, которые в наибольшей степени влияют на конечные показатели процесса отсадки.

Входные возмущения связаны в основном с переменным

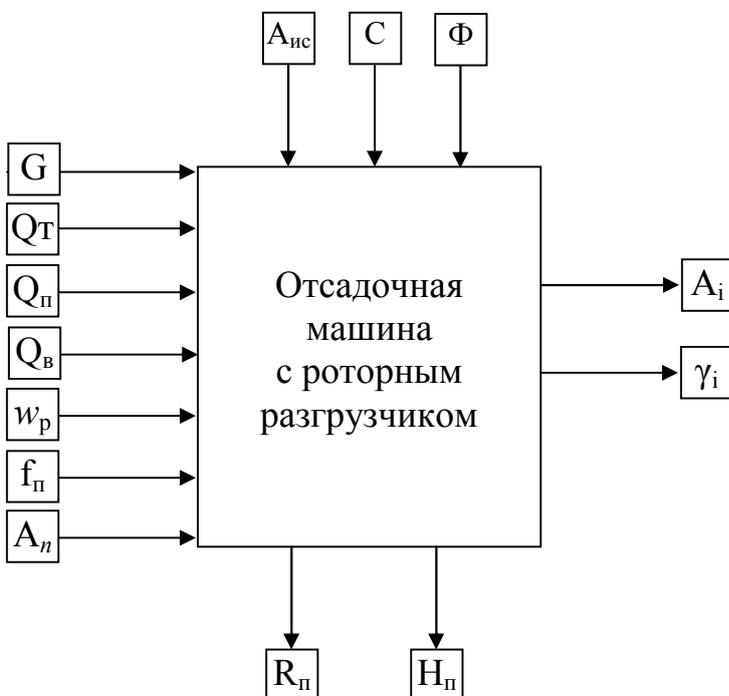


Рис. 5.1 Управляющие, возмущающие и выходные факторы процесса отсадки

характером свойств сырья. Это – фракционный, ситовый состав и зольность, исходного угля ( $\Phi$ ,  $C$ ,  $A_{ис}$ ).

Кроме того на рисунке указаны промежуточные выход-ные параметры отсадочной машины - разрыхленность и высота постели ( $R_{п}$ ,  $H_{п}$ ).

Данные параметры оказывают существенное влияние на выходные показатели – зольности продуктов и их выходы ( $A_i$ ,  $\gamma_i$ ). Они контролируемые, управляемые и, следовательно, могут быть основными факторами, определяющими качественно-количественные показатели процесса отсадки. В свою очередь, указанные параметры могут изменяться с помощью основных каналов управления: разрыхленность ( $R_{п}$ ) – расходом подситной воды ( $Q_{п}$ ), уровень постели ( $H_{п}$ ) – частотой вращения роторного разгрузчика ( $w_p$ ), (рис. 5.2).

Для регулирования разрыхленности постели допустимо использовать и другой канал управления – расход воздуха ( $Q_v$ ), но он менее эффективен.

При этом важным условием эффективного управления работой машины является стабилизация нагрузки на машину ( $G$ ).

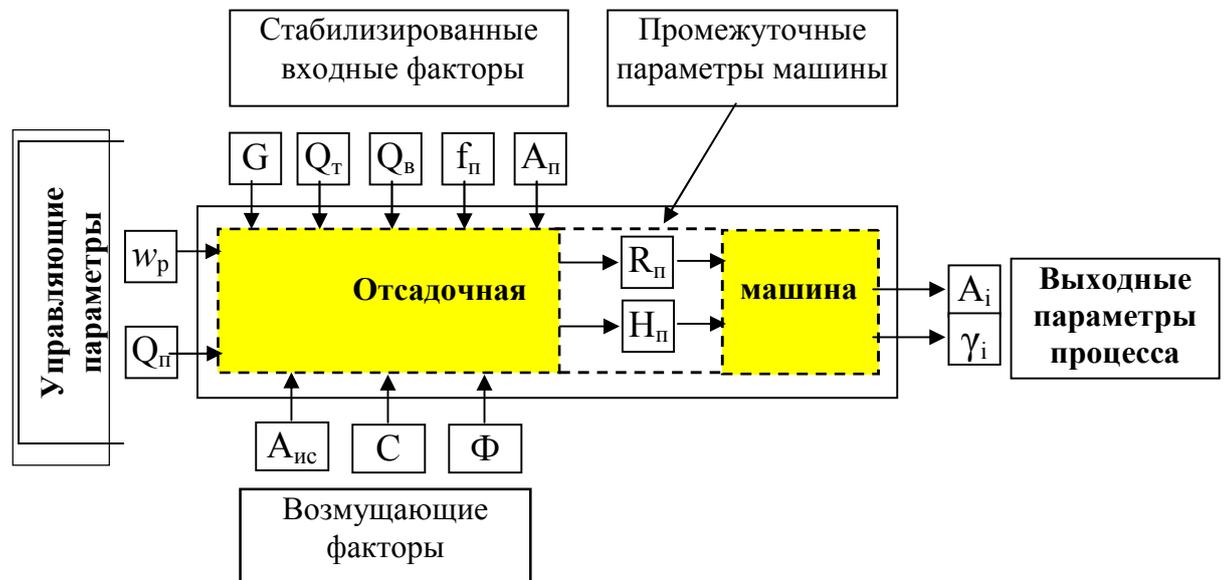


Рис.5.2 – Факторная структура отсадочной машины

Таким образом, при разработке локальной схемы автоматизации отсадочной машины (рис. 5.3), как и системы АСУ, принимаем в качестве основных каналов управления – расход подситной воды и частоту вращения роторных разгрузчиков в каждом отделении (системы 1 и 2).

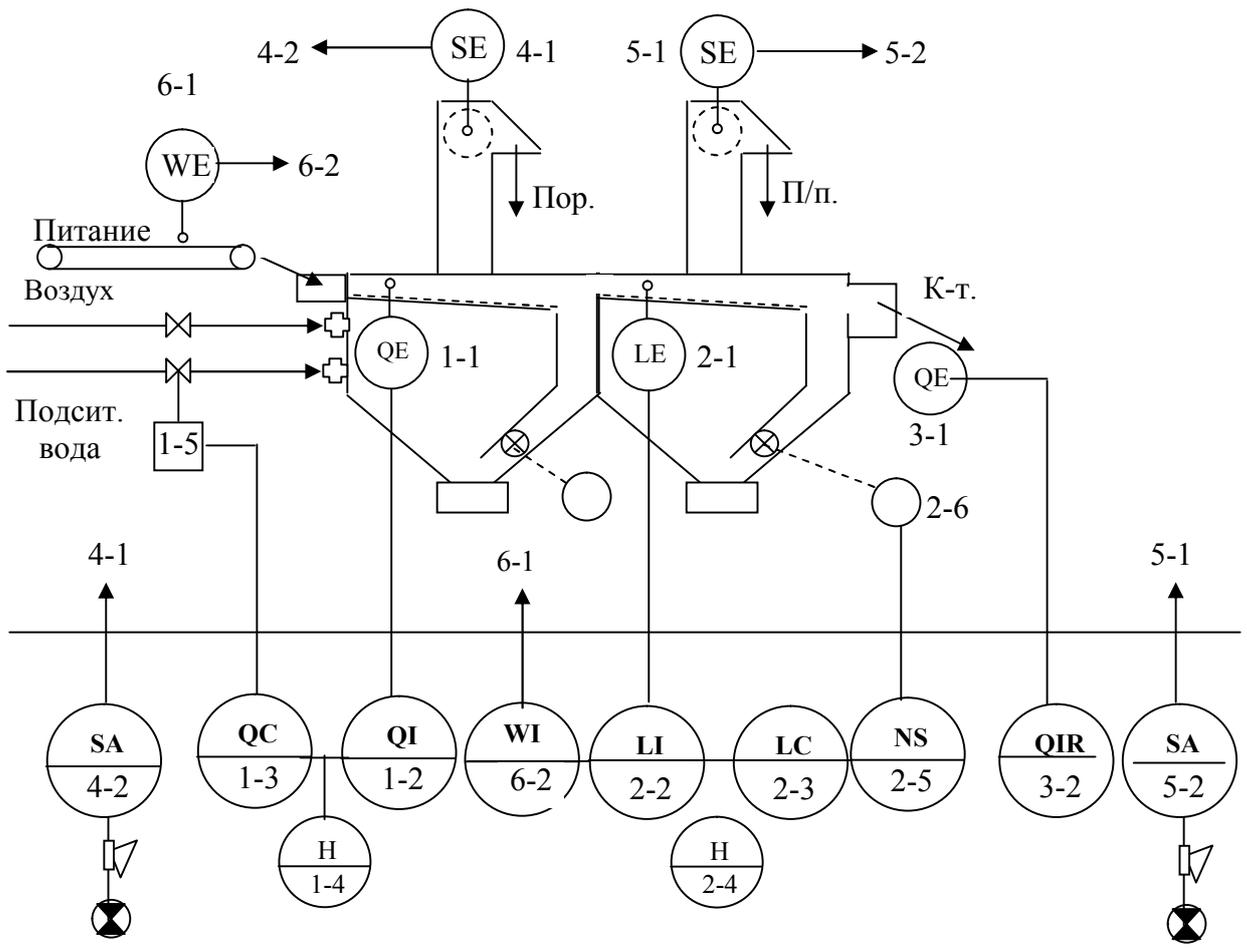


Рис. 5.3 – Локальная схема автоматизации отсадочной машины с роторным разгрузчиком

### 5.1.2. Обогащения в тяжелосредних сепараторах

Тяжелосредняя сепарация – процесс, выходные показатели которого (зольность и выход продуктов) зависят в основном от фракционного состава обогащаемого материала и свойств рабочей суспензии.

На рис. 5.4 показана структура факторов процесса.

Входными факторами здесь являются нагрузка по исходному ( $Q$ ), расход воды и магнетита ( $Q_{в}$ ,  $Q_{м}$ ), обеспечивающие требуемую плотность рабочей суспензии и долевая часть рабочей суспензии, направляемой на регенерацию ( $\alpha_c$ ), определяющая рекомендуемую ее вязкость.

Возмущающими воздействиями являются характеристики исходного материала – зольность, ситовый и фракционный состав ( $A_{ис}$ ,  $C$  и  $\Phi$ ). Промежуточные выходные параметры, определяющие выходные показатели – зольность продуктов обогащения ( $A_i$ ) и их выход ( $\gamma_i$ ), – это плотность ( $\rho_c$ ) и, в меньшей степени, – вязкость ( $\mu_c$ ) рабочей суспензии.

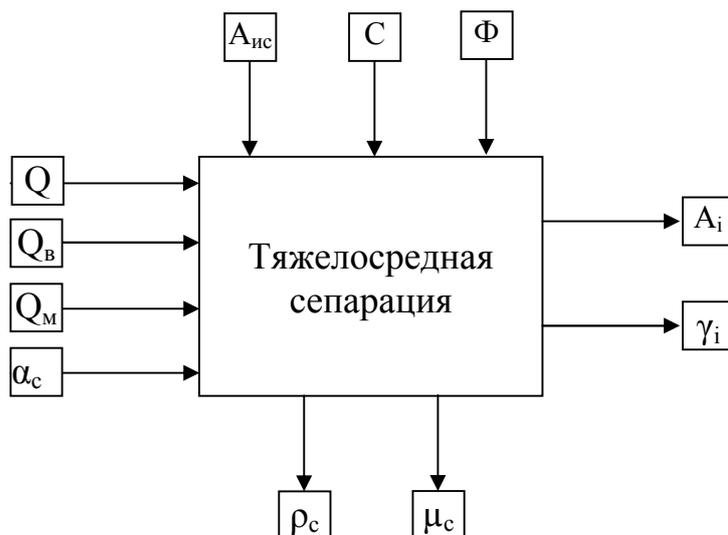


Рис. 5.4 Структура факторов процесса тяжелосредной сепарации

Подготовка и регулирование плотности рабочей суспензии может осуществляться различными способами:

- ❖ приготовление суспензии заданной плотности в отдельной емкости и подача ее по мере необходимости в бак кондиционной суспензии;
- ❖ подача заведомо более плотной суспензии в бак кондиционной суспензии и регулирование плотности рабочей суспензии путем добавления воды.

Вязкость суспензии, как технологический параметр, играет двоякую роль в процессе разделения: с одной стороны снижает скорость разделения фракций по плотности, с другой - положительно влияет на устойчивость суспензии.

Регулируют вязкость, как правило, путем изменения количества рабочей суспензии, подаваемой в систему регенерации, где улавливаются шламы, повышающие вязкость суспензии.

На рис. 5.5 приведен вариант схемы автоматизации процесса тяжелосредной сепарации на колесном сепараторе типа СКВП.

На схеме предусмотрены система регулирования плотности рабочей суспензии (3) и ее вязкости (система 4). При увеличении вязкости сверх заданной увеличивается доля суспензии, направляемой на регенерацию. Это осуществляется с помощью поворотного патрубка и регулирующего органа (4).

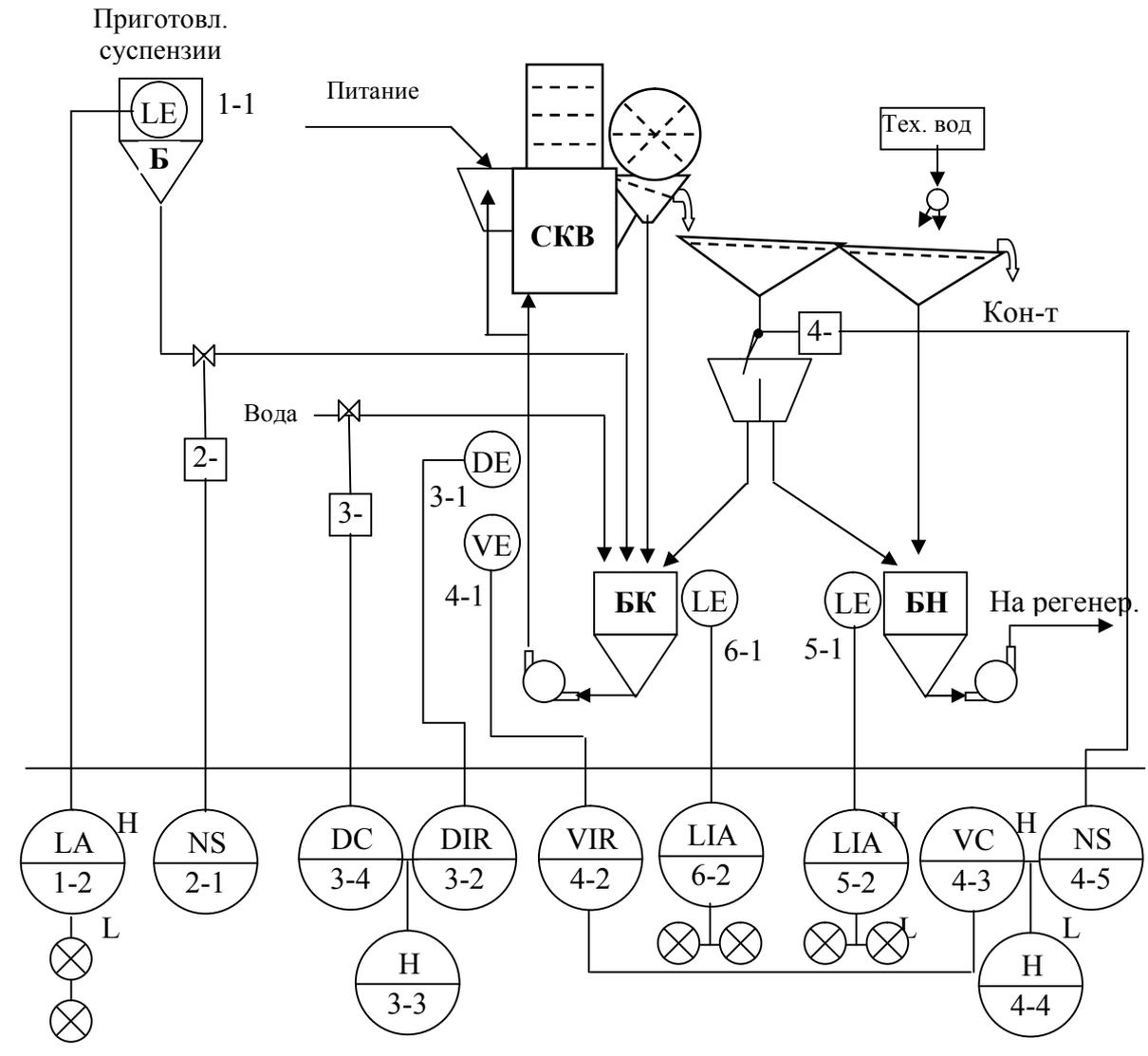


Рис. 5.5 - Схема автоматизации процесса тяжелосредней сепарации в колесном сепараторе

## 5.2. Флото-фильтровальное отделение

### 5.2.1. Флотационный процесс

Флотация – наиболее сложный технологический процесс, зависящий как от управляемых технологических параметров, так и от неуправляемых, как правило, носящих случайный характер. Объектом управления в данном случае является сам процесс, включающий аппарат подготовки пульпы (АКП), флотационные машины и питатели реагентов.

Входные воздействия и выходные параметры процесса угольной флотации представлены на рис. 5.6.

На рисунке указаны входные (регулируемые) факторы: объемная нагрузка на флотацию ( $Q$ ), содержание твердого в пульпе ( $R$ ), расход реагента собирателя ( $q_c$ ) и вспенивателя ( $q_b$ ).

К возмущающим воздействиям отнесены факторы: зольность исходного шлама ( $A_{ис}$ ); гранулометрический, фракционный и петрографический состав шлама соответственно ( $\Gamma$ ,  $\Phi$  и  $\Pi$ ).

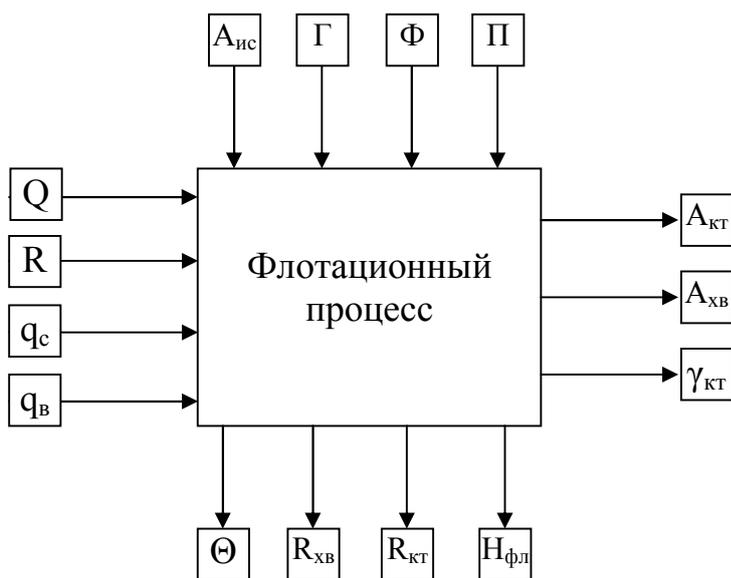


Рис. 5.6 - Управляющие, возмущающие и выходные факторы процесса флотации

является реагентный режим, т.е. расходы собирателя и вспенивателя.

При разработке схемы управления расходами реагентов следует вспомнить механизмы взаимодействия компонентов флотации – частица твердого, пузырек воздуха, капли (частицы) реагентов.

Из физической сущности процесса флотации следует, что расход реагента собирателя должен быть пропорциональным поверхности твердой фазы, на которую должен адсорбироваться реагент. Однако, реализация такой системы дозирования реагента затруднительна из-за сложности оперативного контроля поверхности частиц. Поэтому в настоящее время применяют упрощенную систему регулирования, алгоритм которой можно представить выражением  $q_c = kQ_t$ , где  $k$  – коэффициент пропорциональности,  $Q_t$  [т/ч] – нагрузка на флотацию по твердому продукту. При наличии оперативных датчиков содержания твердого в пульпе ( $R$ , т/м<sup>3</sup>) и объемной нагрузки ( $Q$ , м<sup>3</sup>/ч) загрузка по твердому продукту вычисляется перемножением указанных параметров:  $Q_t = RQ$ .

Дозирование реагента вспенивателя должно производиться пропорционально объемной нагрузке на флотацию, что обеспечит стабильную степень аэрации единицы объема пульпы ( $\Theta$ ).

Основные выходные параметры, определяющие эффективность процесса, представлены показателями: зольность и выход концентрата ( $A_{кт}$ ,  $\gamma_{кт}$ ) и зольность хвостов флотации ( $A_{хв}$ ).

Дополнительными промежуточными выходными параметрами могут служить уровень пульпы в ванне флотомашине ( $H_{ф}$ ), разжиженность хвостов и концентрата ( $R_{хв}$ ,  $R_{кт}$ ) и степень аэрации пульпы в камерах машины ( $\Theta$ ).

Наиболее гибким и действенным каналом управления процессом флотации

Важным входным фактором процесса является и объемная нагрузка на машину. Она должна быть таковой, чтобы обеспечить требуемое время флотации (время нахождения пульпы в камерах машины). Фактическое время флотации можно оценить, как  $t_{фл} = Q/V_k$ , где  $V_k$  – суммарный объем камер машины. Понятно, что снижение времени флотации относительно номинального приведет к потере горючей массы с хвостами, а увеличение – к засорению концентрата и снижению производительности машины.

Важным технологическим параметром флотационной машины является уровень пульпы в камерах. Отклонение уровня пульпы в меньшую сторону от рекомендуемого для данной машины вызывает потерю пенного продукта с хвостами (пенгоны полностью не снимают пену), а увеличение – перелив пульпы в приемник концентрата, т.е. к засорению концентрата.

На рис. 5.7 показан вариант схемы автоматизации и управления процессом угольной флотации.

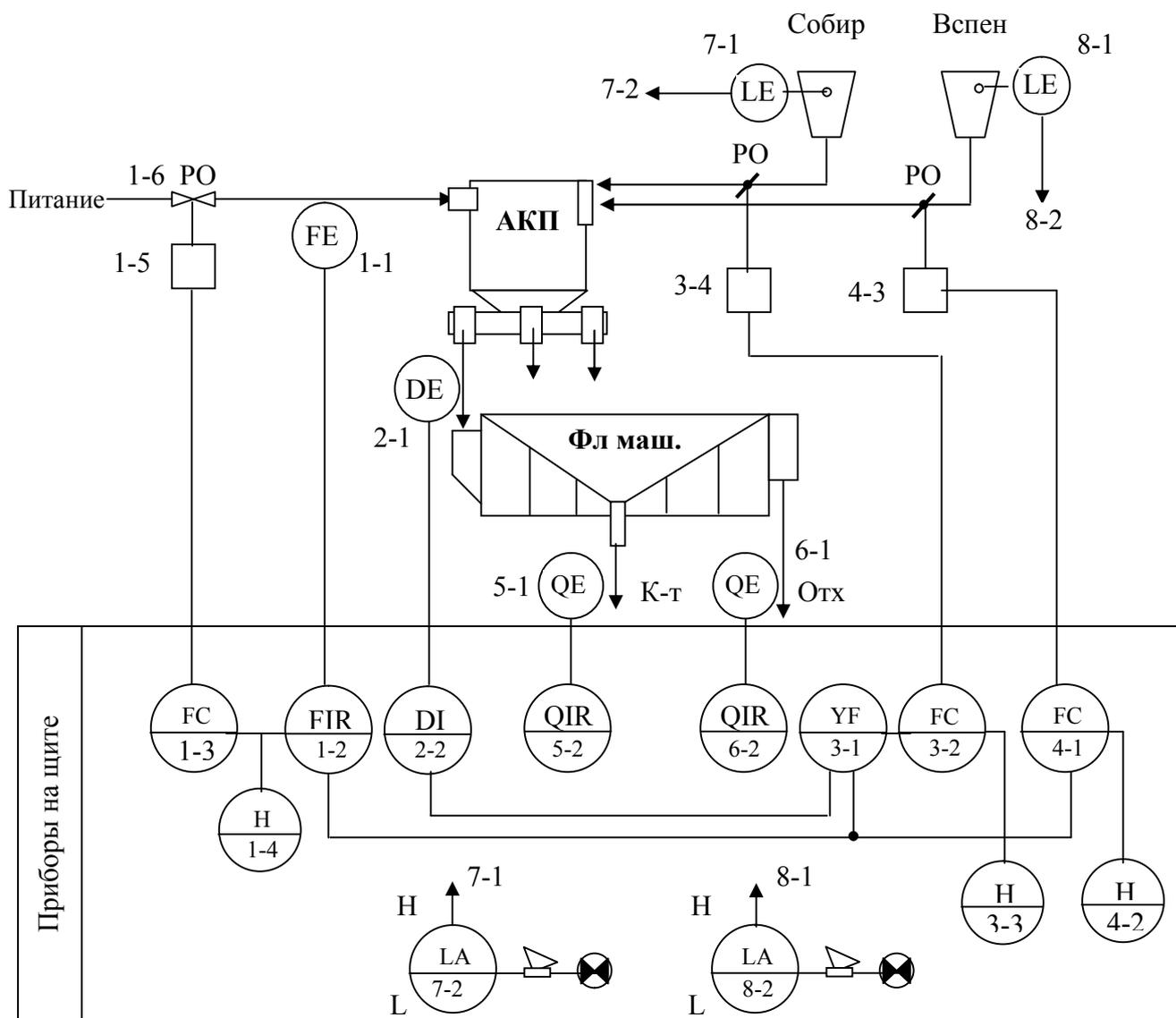


Рис. 5.7 - Схема управления и автоматизации процесса угольной флотации

В соответствие с выполненным анализом в схему автоматизации включаем следующие системы.

1. Система стабилизации объемной нагрузки на процесс (система 1), содержащая первичный датчик расхода (поз. 1-1), вторичный показывающий и регистрирующий прибор (1-2), регулятор расхода (1-3), задатчик (1-4), исполнительный механизм (1-5) и регулирующий орган (1-6), установленный на питающем пульпопроводе.
2. Система контроля содержания твердого в пульпе (система 2).
3. Система дозирования реагента-собирателя (система 3).
4. Система дозирования реагента-пенообразователя (система 4)
5. Системы контроля зольности концентрата (система 5) и отходов (система 6).
6. Системы дискретного контроля с сигнализацией верхнего и нижнего уровней реагентов в баках (системы 7 и 8).

### 5.2.2 Процесс обезвоживания флотоконцентрата на вакуум-фильтре

На рис. 5.8 показана структура факторов вакуум-фильтра, оборудованного приводом с регулируемой частотой вращения дисков.

Основными выходными параметрами являются производительность фильтра по кеку и его влажность ( $G$ ,  $W_k$ ). Дополнительные выходные факторы – расход и плотность фильтрата ( $q_\phi$ ,  $\delta_\phi$ ).

К промежуточному выходному параметру следует отнести уровень пульпы в ванне вакуум-фильтра ( $H_n$ ), во многом определяющем его режим работы.

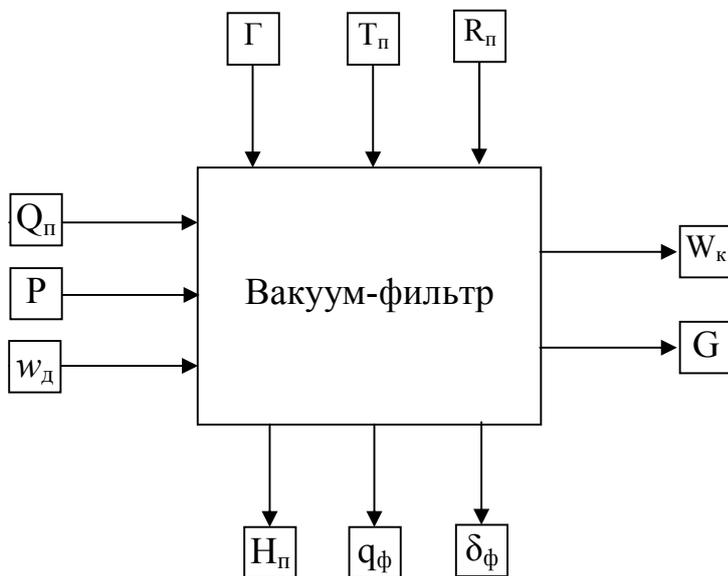


Рис. 5.8 - Структура факторов процесса обезвоживания на вакуум-фильтре

Возмущающие воздействия представляются гранулометрическим составом концентрата ( $\Gamma$ ), разжиженностью и температурой пульпы ( $R_n$ ,  $T_n$ ). Основными управляющими воздействиями на объект принимаются объемная нагрузка ( $Q_n$ ), разряжение в дисках фильтра ( $P$ ) и частота вращения дисков ( $w_d$ ).

При разработке принципа управления процессом обезвоживания в вакуум-фильтрах нужно учитывать технологическую связь: флотомашины – сборник

флотоконцентрата – вакуум-фильтры. Важная здесь задача – согласование производительности флото- и фильтровального отделений по пенному

продукту, так как связывающий их сборник флотоконцентрата имеет ограниченный объем.

В данном технологическом комплексе обезвоживание концентрата – процесс "подчиненный", должен принимать всю нагрузку с флотомашин.

Следует иметь в виду, что статическая характеристика вакуум-фильтра в координатах "частота вращения дисков - производительность" имеет экстремальный характер. При этом максимальная производительность фильтра, как правило, не соответствует требуемой влажности продукта.

Другими словами, при автоматическом поддержании требуемой влажности кека (путем снижения частоты вращения дисков) возникает ситуация, когда переполняется сборник флотоконцентрата перед фильтрами. Перелив допускать не рекомендуется, следовательно, необходимо увеличивать производительность фильтров, что возможно либо путем увеличения частоты вращения дисков (до определенного предела), либо введением в работу резервных вакуум-фильтров. Первый способ приведет к увеличению влажности кека, второй – не всегда реализуемый и требует длительного времени.

Решение рассмотренной проблемы лежит, очевидно, в применении сложной системы многоуровневого управления, учитывающей большое число факторов и требований к конечной влажности продукта.

С учетом изложенного ниже представлен вариант схемы управления процессом обезвоживания флотоконцентрата на вакуум-фильтре (рис. 5.9).

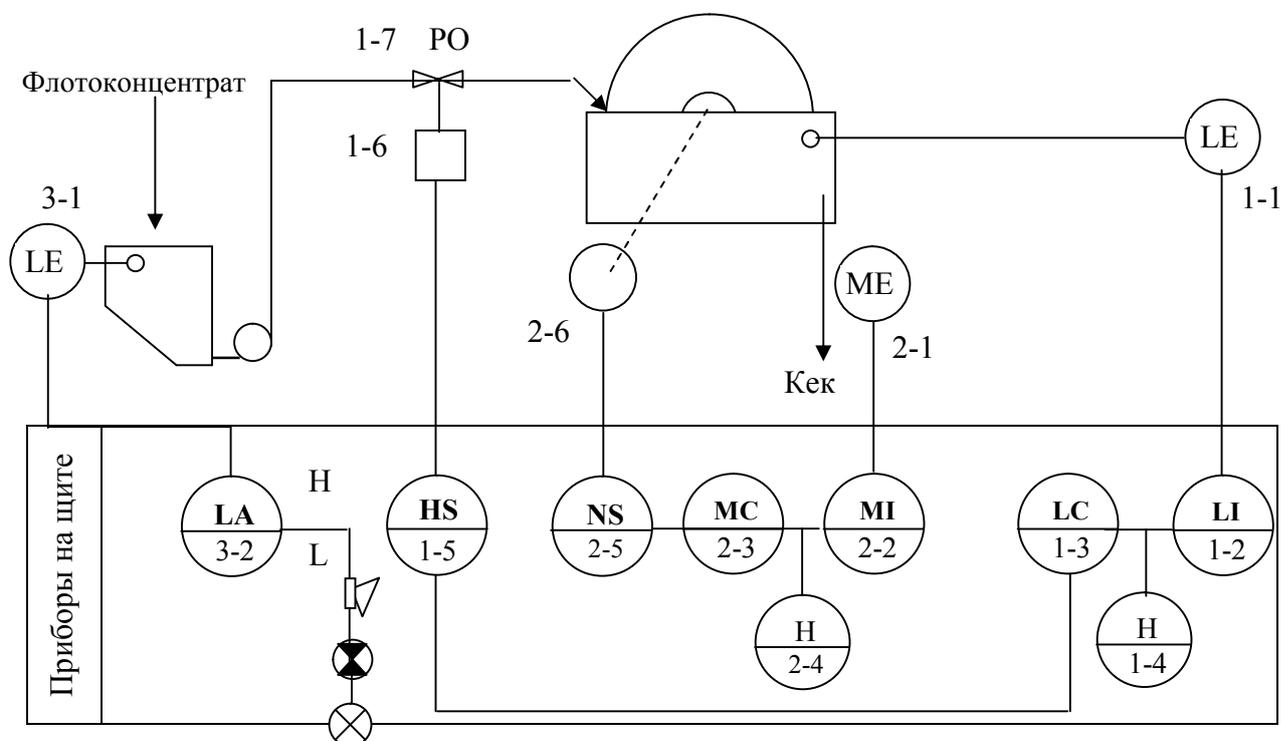


Рис. 5.9 - Схема автоматизации процесса фильтрации флотоконцентрата

Принимаем для рассматриваемой схемы автоматизации 3 независимые системы:

- 1 Система стабилизации уровня пульпы в ванне вакуум-фильтра (поз.1).
- 2 Система регулирования влажности кека (поз. 2).
- 3 Система контроля верхнего уровня пульпы в зумпфе (поз. 3).

## 6. Анализ влияния входных факторов и возмущений на вспомогательные процессы и выбор каналов управления

В данном разделе рассмотрим системы для автоматического управления – процессами термической сушки и сгущения пульпы.

### 6.1. Особенности сушильных установок как объектов управления

Сушильные установки обогатительных фабрик состоят из двух частей – топочного устройства с дутьевыми установками, служащего для выработки газообразного теплоносителя, и собственно сушилок.

Целью автоматического управления процессами сушки является стабилизация (или оптимизация) конечной влажности продуктов обогащения с максимальной производительностью сушильных агрегатов.

Технологически топочное устройство и сушильный агрегат представляют собой единый комплекс (рис. 6.1), в котором топка решает задачу подготовки необходимого количества теплоносителя ( $Q_T$ ) с заданной температурой ( $T_T$ ), а сушильный агрегат – обеспечить требуемую влажность сушонки ( $W_c$ ).

К управляющим параметрам топочного устройства относятся количество поступающего топлива ( $G_T$ ) и количество подаваемого воздуха на горение ( $Q_B$ ). Основным возмущением на данный агрегат является теплота сгорания подаваемого топлива, определяемая его характеристиками ( $q_T$ ).

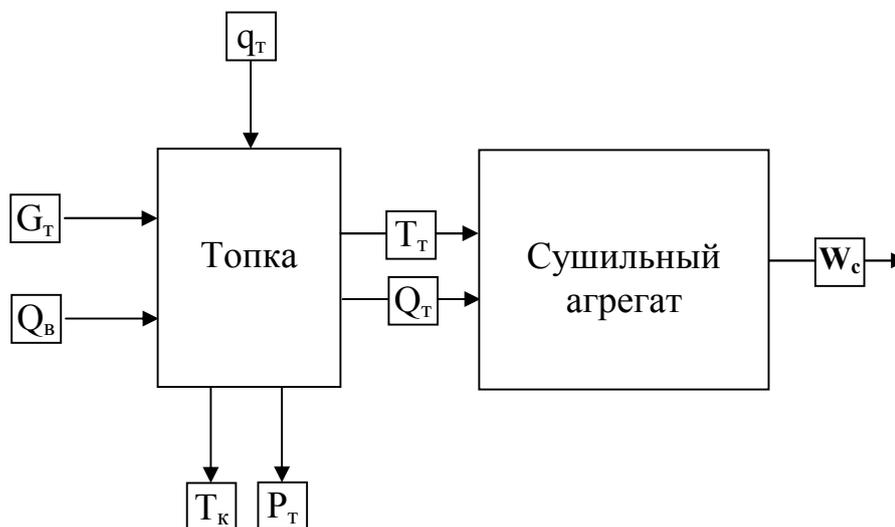


Рис. 6.1 - Факторная взаимосвязь топочного устройства

К промежуточному выходному параметру следует отнести температуру газа в камере сгорания ( $T_K$ ) и разряжение в топке ( $P_T$ ), являющиеся показателем сбалансированной работы тягодутьевых аппаратов и безопасности эксплуатации топки.

Главные выходные факторы топки, они же являются входными для сушильного агрегата – количество и температура теплоносителя ( $Q_T$  и  $T_T$ ).

## 6.2. Схема автоматизации топки с цепной решеткой

На рис. 6.2 изображена схема автоматизации топки слоевого сжигания с цепными решетками прямого хода.

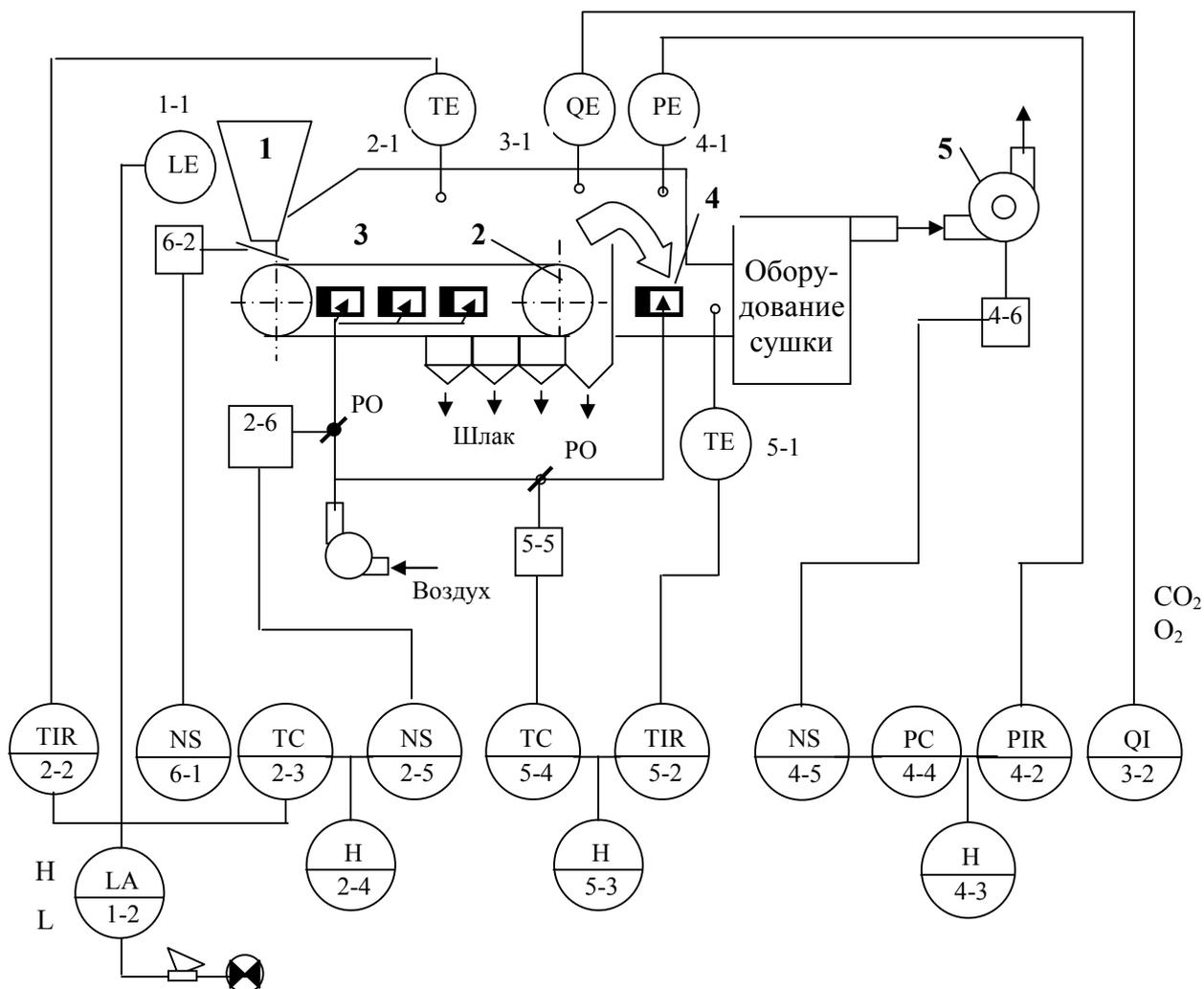


Рис 6.2 - Схема автоматизации топки с цепной решеткой

На схеме обозначены технологические узлы:

- 1 – бункер топлива;
- 2 – цепная решетка;
- 3 – камера сгорания топлива;
- 4 – камера смешения;
- 5 – дымосос.

Основная задача топки сушильного отделения – подготовка определенного количества газового теплоносителя с заданной температурой. Эта задача решается системами регулирования (2), (4) и (5), рис. 6.2.

Особое внимание здесь следует уделить АСР разряжения в топке. Это связано с требованиями техники безопасности. При отсутствии требуемого

разряжения в топке (и других аппаратах сушильного отделения), вредные для организма человека продукты горения топлива, особенно оксид углерода (СО), могут поступать в помещения сушильного отделения.

Для оценки эффективности сжигания топлива предусмотрен контроль содержания  $\text{CO}_2$  и  $\text{O}_2$  с помощью газоанализатора (3-2).

### 6.3. Схемы автоматизации сушильных установок

К входным (управляемым) факторам сушильного агрегата (рис. 6.3) следует отнести нагрузку на агрегат по подсушиваемому материалу ( $G_M$ ), количество подаваемого в загрузочную камеру воздуха на разбавление

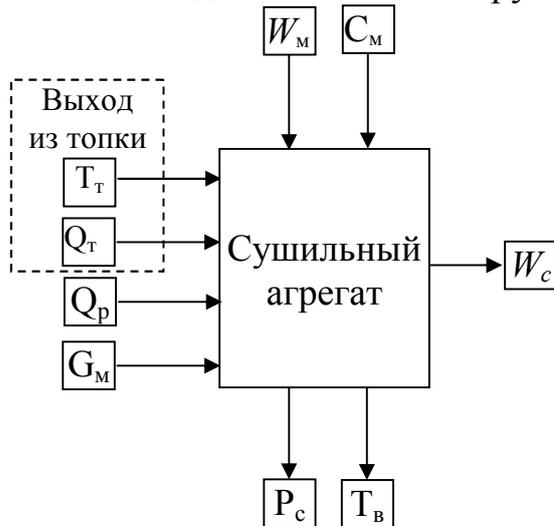


Рис. 6.3 - Факторная структура сушильного агрегата

теплоносителя ( $Q_P$ ). Возмущения на данный объект могут быть влажность исходного материала ( $W_M$ ) и его ситовый состав ( $C_M$ ). К промежуточным выходным факторам отнесем разрежение в агрегате ( $P_C$ ) и температура газа в его выгрузной камере ( $T_B$ ).

Особое положение занимают параметры теплоносителя (продуктов горения), поступающего в сушилку из топочного устройства - температура ( $T_T$ ) и расход ( $Q_T$ ).

С одной стороны – это основные факторы, определяющие влажность продукта ( $W_C$ ), т.е. их можно отнести к

основным каналам управления. С другой – это выходные параметры топочного устройства, зависящие от режимных параметров топки.

Упрощенная схема автоматизации барабанной сушильной установки приведена на рис. 6.4, трубы-сушилки на рис. 6.5.

#### **Барабанная сушильная установка.**

Технологические элементы схемы:

БУ – бункер угля (исходный), ЗК – загрузочная камера, РК – разгрузочная камера, БЦ – батарейный циклон, МП – мокрый пылеуловитель.

Основной регулируемый параметр – влажность сушонки, (система 1). Каналом управления здесь принята нагрузка на барабан, которая изменяется с помощью привода питателя (поз. 1-6).

Второй важный параметр – температура газов на входе в барабан. Но она стабилизируется системой регулирования (5), расположенной в схеме автоматизации топки (рис. 6.2), здесь же осуществляется дополнительный ее контроль (система 2).

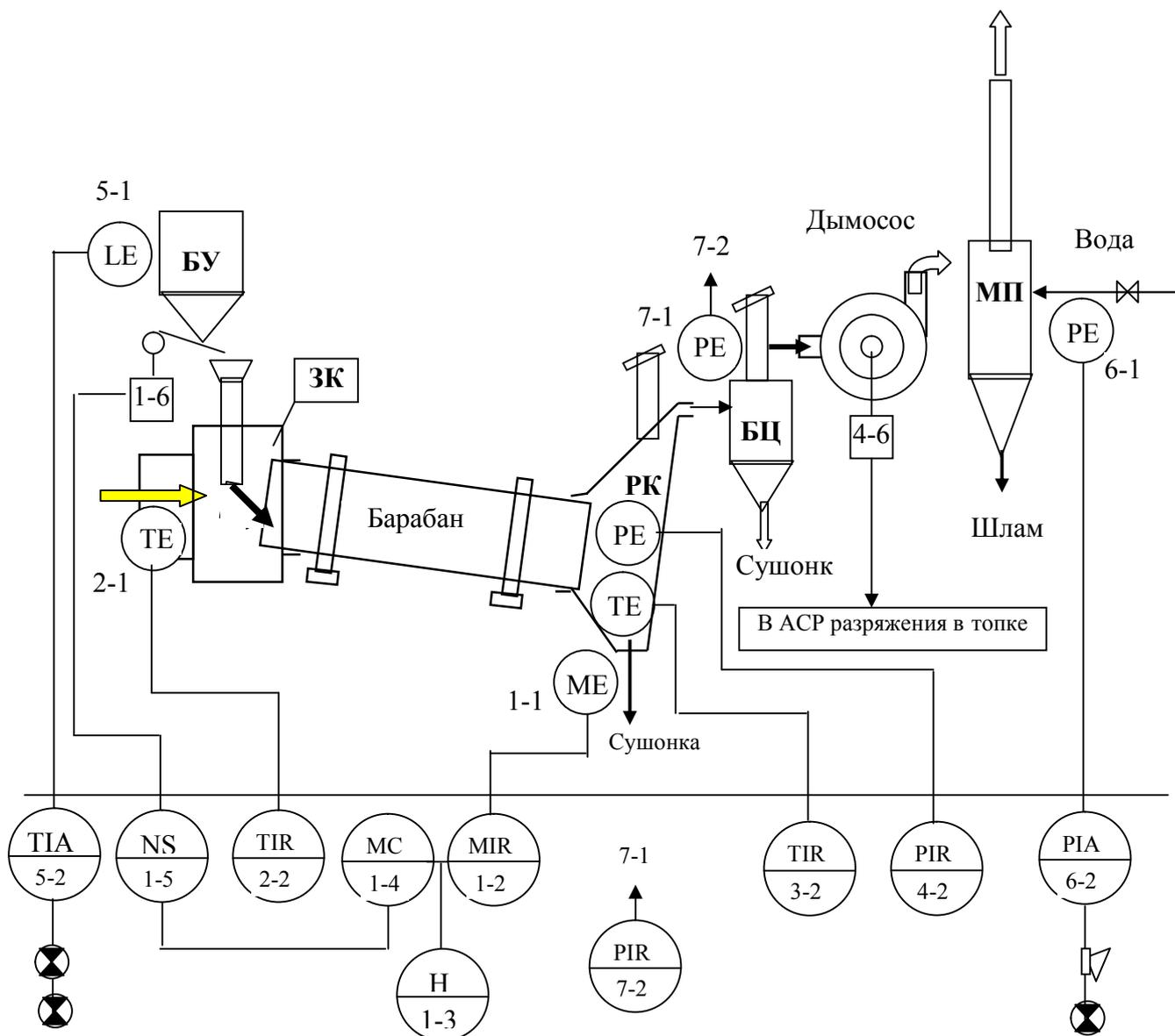


Рис. 6.4 - Схема автоматизации барабанной сушильной установки

Следует обратить внимание, что разряжение в технологическом оборудовании здесь только контролируется, а регулируется оно с помощью направляющего аппарата дымососа в топке (рис. 6.2).

#### **Схема автоматизации трубы-сушилки.**

Технологическая схема отличается от вышерассмотренной в основном сушильным агрегатом. Здесь применяется труба-сушилка (1), снабженная в нижней части забрасывателем влажного угля. В забрасыватель влажный уголь дозируется с помощью питателя, расположенного под бункером (2). Для выгрузки сушонки применен разгрузочный циклон (4), окончательная очистка газов осуществляется батарейным циклоном (5) и мокрым пылеуловителем (7). Дымосос здесь обозначен позицией (6).

Один из вариантов схемы автоматизации трубы-сушилки показан на рис. 6.5. Локальные АСР в этой схеме аналогичны вышерассмотренным.

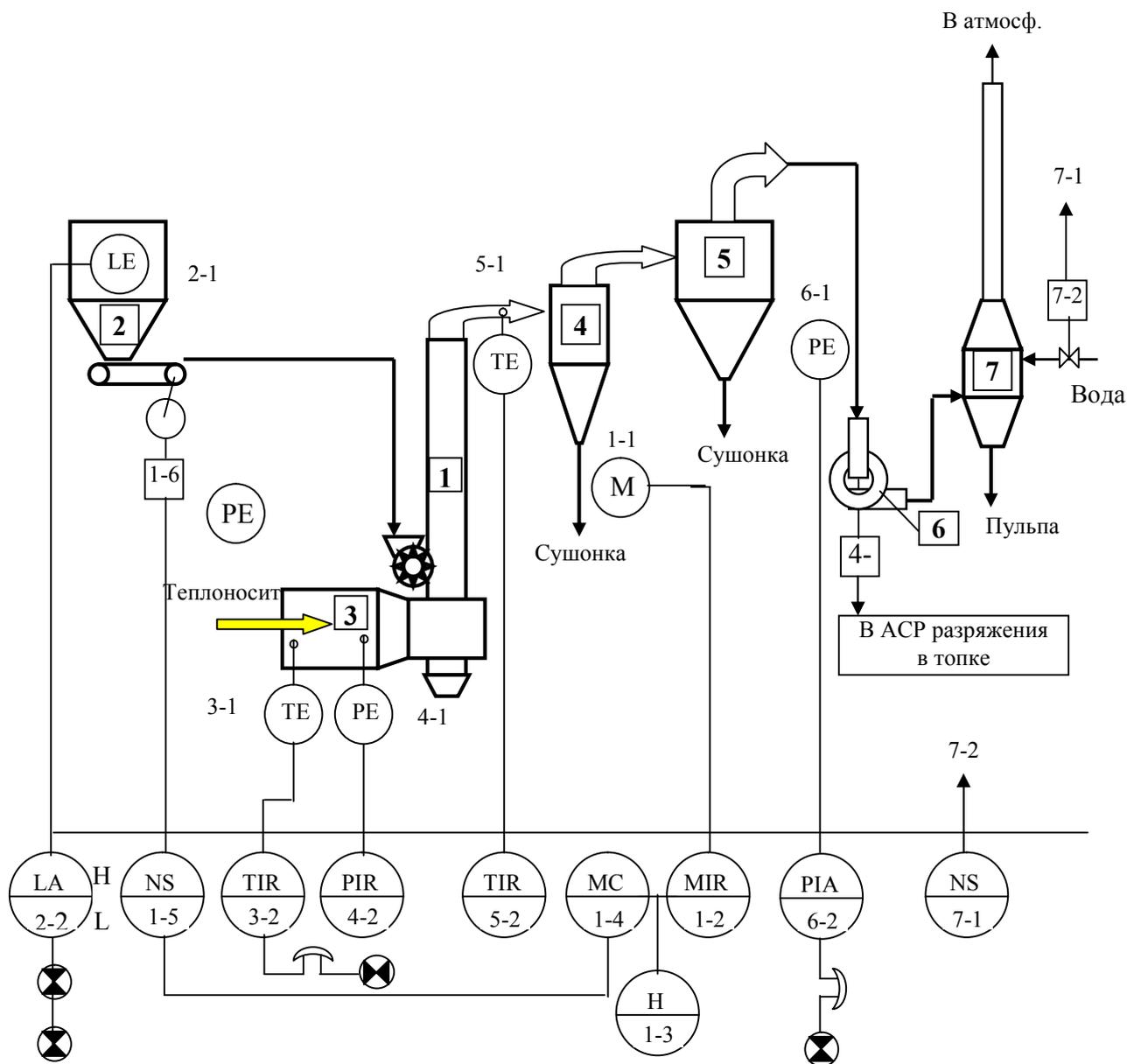


Рис. 6.5 - Схема автоматизации трубы-сушилки

#### 6.4. Процесс сгущения пульпы

Для примера рассмотрим автоматизацию процесса сгущение хвостов флотации в радиальном сгустителе, работающем на многих углеобогатительных фабриках. Важность поставленного вопроса объясняется тем, что чистота используемого в качестве оборотной воды слива во многом определяет эффективность последующих гравитационных процессов.

Радиальный сгуститель, как объект автоматизации, сложный инерционный объект (рис. 6.6). Характеризуется основными выходными параметрами – плотность сгущенного продукта ( $\delta_{сг}$ ) и плотность слива ( $\delta_c$ ).

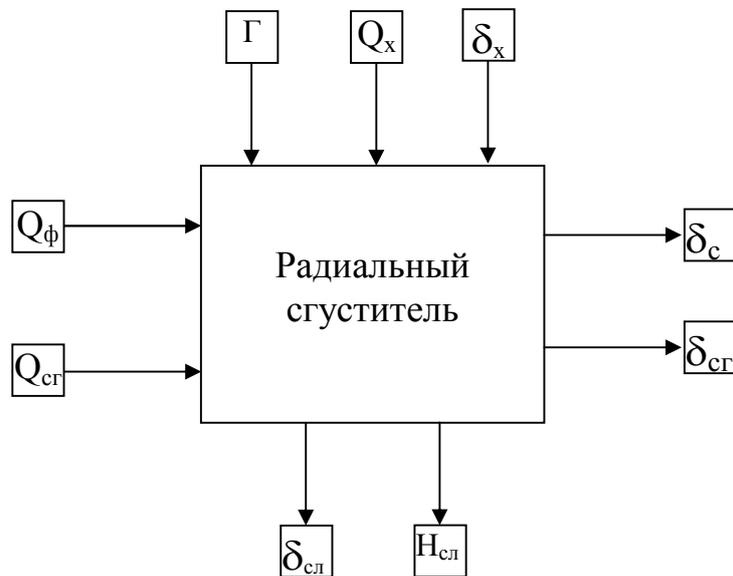


Рис. 6.6 - Структура факторов процесса сгущения

Основные возмущающие воздействия – расход, плотность и гранулометрический состав твердой фазы питания ( $Q_x, \delta_x, \Gamma$ ).

Промежуточные выходные параметры, непосредственно влияющие на выходные факторы, - высота осветленного слоя ( $H_{сл}$ ) и его плотность ( $\delta_{сл}$ ).

С точки зрения требований технологии целью управления радиальным сгустителем является: стабилизация плотности сгущенного продукта ( $\delta_{сг} = const$ ) и выполнение условия  $\delta_{сл} < \delta_{сл\ доп}$ , где  $\delta_{сл\ доп}$  - допустимая плотность слива.

Управляющим воздействием по первому критерию может служить величина сечения выпускного отверстия сгустителя, по второму - расход флокулянта.

Однако реализация системы регулирования плотности слива (по отклонению) путем изменения расхода флокулянта проблематична.

Из теории авторегулирования известно, что если

$$\tau_{об} > 1/\alpha, \quad (6.1)$$

где  $\alpha$  - параметр, характеризующий среднюю скорость изменения возмущающего воздействия;

$\tau_{об}$  - общее запаздывание объекта регулирования, то система регулирования по отклонению становится бесполезной, даже в некоторых случаях вредной.

Радиальные сгустители по указанному каналу управления характеризуются большим значением инерционности, что приводит к выполнению условия (6.1), т.е. АСР неработоспособна.

Данная проблема может быть решена двумя способами. Первый – с помощью системы регулирования по возмущению ( $Q_{пит}$ ). Второй – стабилизацией высоты осветленного слоя в сгустителе путем изменения расхода флокулянта. По этому каналу инерционность объекта значительно меньшая и реализация АСР по отклонению реальна. Некоторую сложность представляет автоматический контроль высоты осветленного слоя. Ниже будет предложен вариант косвенной оценки толщины осветленного слоя.

Пример схемы автоматизации приведен на рис. 6.7. Здесь предусмотрено две системы авторегулирования по отклонению. Первая АСР (система 1) стабилизирует высоту осветленного слоя путем изменения расхода флокулянта.

В систему входит датчик высоты осветленного слоя (1-1) и обычные стандартные элементы.

Вторая АСР (система 2) стабилизирует плотность сгущенного продукта. Работа системы аналогично вышерассмотренным.

Аварийный контроль плотности слива осуществляется с помощью фотометрического мутномера (3-1), вторичного прибора с контактной группой и средств сигнализации (3-3). Это решение актуально для угольных обогатительных фабрик, где слив используется в качестве оборотной воды.

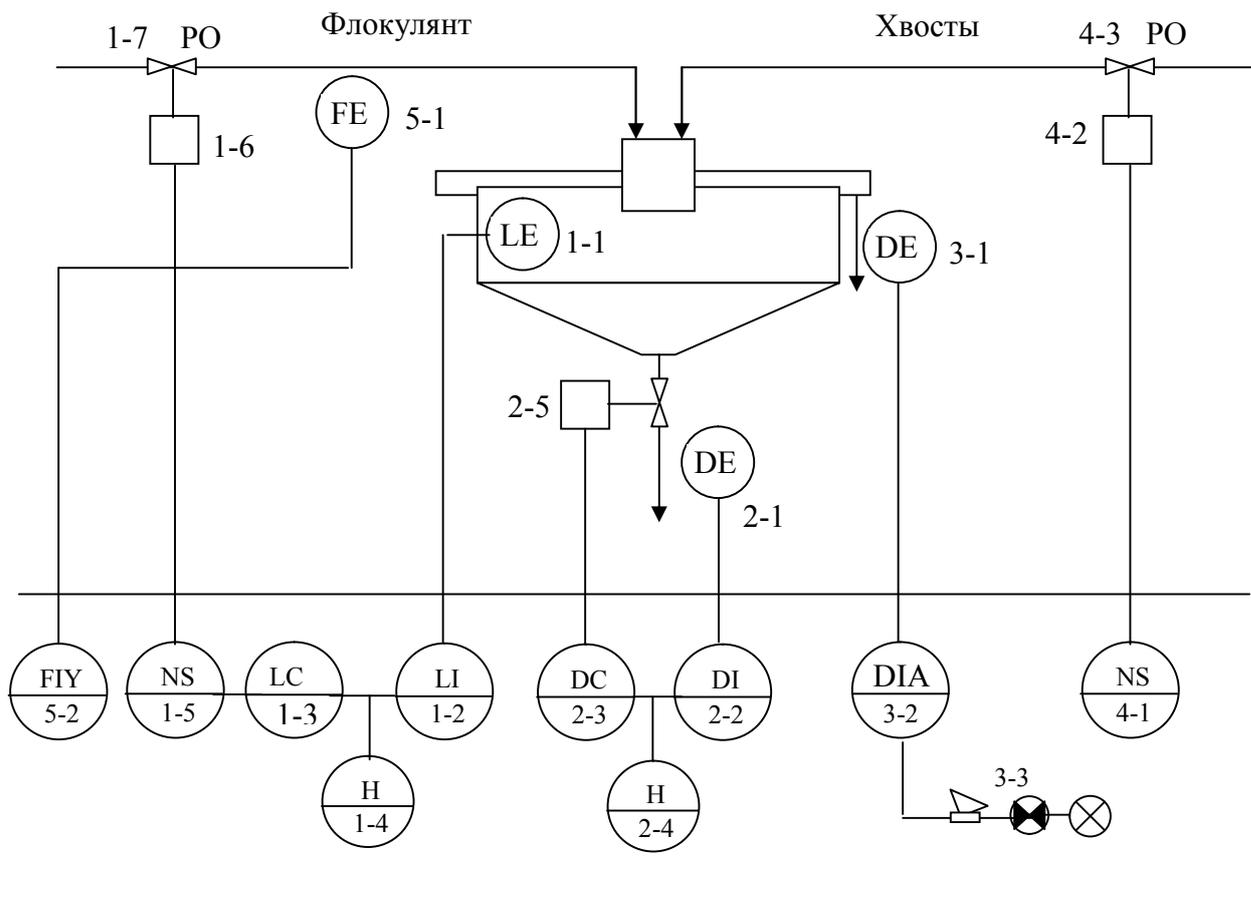


Рис. 6.7 - Вариант схемы автоматизации радиального сгустителя

Учитывая высокую стоимость современных флокулянтов целесообразно осуществлять контроль их расхода с суммированием (система 5).

Здесь предусмотрена типичная схема дистанционного управления регулирующим органом на пульпопроводе питания сгустителя.

На схеме не приведены системы сигнализации и защиты от перегруза фермы, которыми комплектуются радиальные сгустители с периферийным приводом.

## **7 Особенности автоматического управления процессами рудного обогащения**

Обогащение руд черных и цветных металлов включает ряд процессов, которые не характерны для обогащения углехимического сырья. Это, прежде всего подготовительные операции (дробление, измельчение, классификация), магнитное разделение, процессы дешламации, гидрометаллургические методы.

### **7.1. Автоматизация рудоподготовки**

Рудоподготовка включает процессы дробления, грохочения и измельчение руды.

**7.1.1. Автоматический контроль процесса дробления.** Технологически целесообразно осуществлять автоматический контроль количества перерабатываемого материала, гранулометрического состава дробленого продукта, уровней материала, наличия в руде посторонних металлических предметов, температуры подшипников и обмоток электродвигателей и системы централизованной смазки.

Количество перерабатываемого материала измеряют конвейерными весами, крупность дробленого продукта можно контролировать различными гранулометрами.

Наличие верхнего уровня руды на различных участках дробилки дает информацию о перегрузке или о забивке нижней разгрузочной щели. Для контроля верхнего уровня используются сигнализаторы наличия руды и гамма-реле, а для токопроводящих руд - электродные уровнемеры.

Контроль нижнего уровня в приемных бункерах необходим не только для получения информации о количестве материала, но и для предохранения питателей от разрушения падающими кусками руды при загрузке бункера (на пластинчатом питателе постоянно должен оставаться небольшой слой материала).

Нижний уровень контролируют преимущественно с помощью гамма-реле.

Датчики-реле нижнего уровня в приемных бункерах применяются также в схемах сигнализации и защиты.

Для автоматического обнаружения посторонних металлических предметов устанавливаются стандартные металлоискатели и металлоуловители.

Контроль температуры узлов трения и обмоток электродвигателей может быть осуществлен с помощью термо- или тензорезисторов, а регистрация - многоточечных автоматических мостов переменного тока со встроенными контактными устройствами, которые используются в схемах защиты и сигнализации.

Все современное дробильное оборудование оборудовано системами централизованной смазки. Аппаратура для контроля системы смазки, поставляемая, как правило, комплектно с дробилкой, включает приборы для

измерения температуры масла, уровня в маслобаке и давления в маслопроводе.

**7.1.2. Автоматическое регулирование процесса дробления.** Из-за невозможности в современных дробилках оперативно изменять величины разгрузочной щели, автоматического регулирования процесса сводится в основном к стабилизации нагрузки на дробилку.

Автоматическое регулирование производительности дробилки можно производить путем стабилизации количества подаваемой руды, степени загрузки дробилки материалом, тока или мощности, потребляемой электродвигателем дробилки и удельного расхода электроэнергии.

На рис. 7.1 приведено два варианта схем автоматизации конусной дробилки. Технологические схемы вариантов отличаются только наличием операции грохочения (3) в схеме "а".

Первая схема реализует автоматическую стабилизацию нагрузки на дробилку, используя в качестве сигнала отклонения потребляемую двигателем мощность

Система включает первичный преобразователь потребляемой мощности (2-1), типичный набор элементов АСР (вторичный прибор, регулятор с задатчиком и станция управления). В качестве привода пластинчатого питателя принят асинхронный электродвигатель (2-5) с тиристорным управлением, что позволяет плавно изменять производительность питателя.

Основным недостатком данной схемы автоматизации является зависимость потребляемой двигателем мощности от свойств руды

(твердость, крупность, влажность). Поскольку АСР рассчитывается для условия дробления руды со средними механическими свойствами, не исключается возможность переполнения загрузочной части дробилки при поступлении более мягкой или мелкой руды.

Следует обратить внимание, что наличие грохота между объектом регулирования (дробилка) и регулирующим органом (питатель) значительно усложняет работу АСР, так как в объект вводится транспортное запаздывание.

Указанные недостатки отсутствуют в схеме автоматизации, показанной на рис. 7.1, б. В качестве входного сигнала в данной схеме принято отклонение удельного расхода электроэнергии. Сигнал пропорциональный удельному расходу энергии определяется путем деления в блоке (2-3) сигнала от преобразователя мощности (2-1) на сигнал от весоизмерительной системы (2-2). При чрезмерном заполнении дробилки материалом, вследствие, например, снижения его прочности, на регулятор (2-4) поступает информация от датчика уровня (2-5), запрещающая дальнейшее увеличение нагрузки на дробилку.

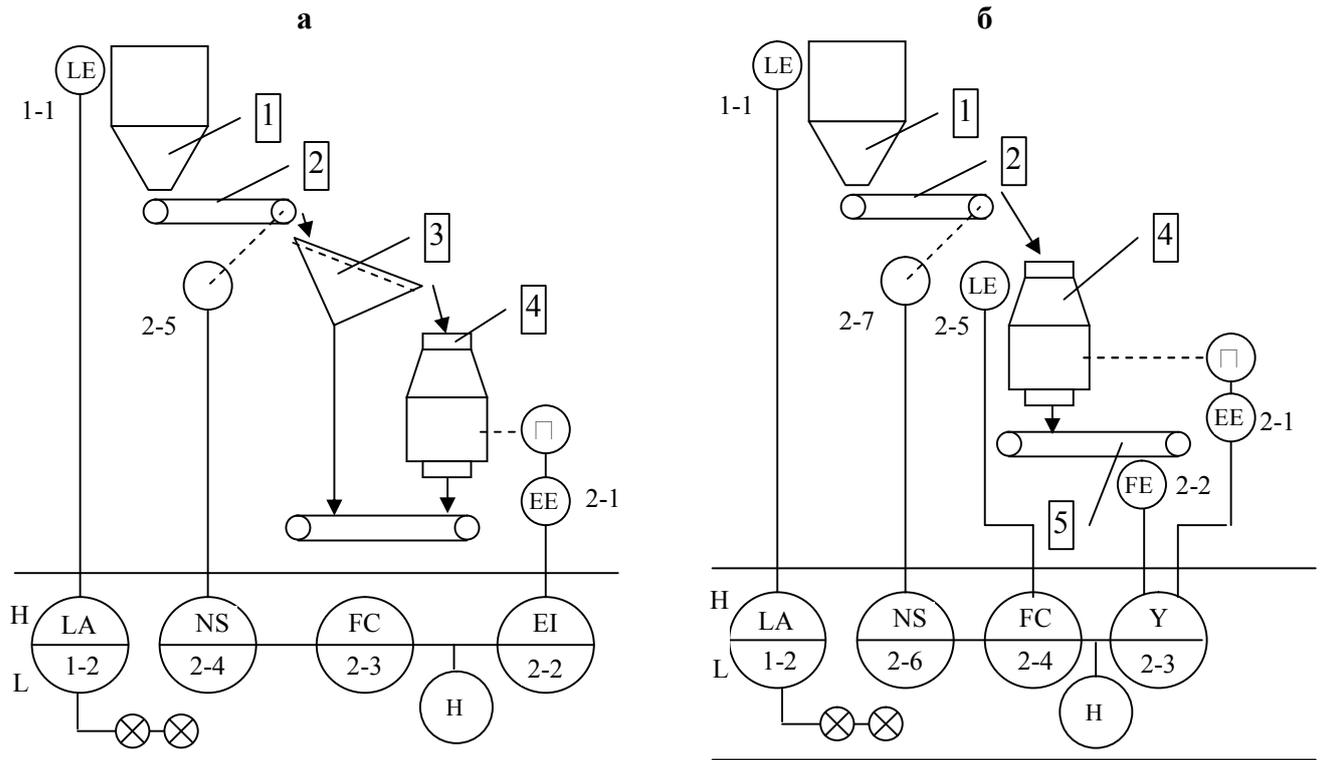


Рис. 7.1 - Схемы автоматизации процесса дробления  
 а – по потребляемой мощности; б – по удельному расходу энергии  
 1 – бункер; 2 – питатель пластинчатый; 3 – грохот; 4 – дробилка конусная; 5 - конвейер

В обеих схемах автоматизации предусмотрен контроль верхнего и нижнего уровня в бункерах исходного (системы 1).

На практике чаще реализуется принцип стабилизации потока и запаса материала для процессов крупного, среднего и мелкого дробления путем управления поточно-транспортной системой (ПТС) цехов и заполнением дробилок и грохотов рудой. Управление ПТС обеспечивает стабильность потока руды по технологической схеме, включая звенья: бункера, конвейеры, грохоты, дробилки, питатели, перегрузочные узлы.

Для автоматизации заполнения бункеров можно рекомендовать аппаратуру автоматического управления загрузкой бункера, включающую устройство дистанционной передачи информации и аппаратуру автоматизации загрузки бункера, выпускаемую Луганским заводом "Углеприбор". Аппаратура управляет передвижением загрузочного механизма над бункером в автоматическом, дистанционном и местном режимах с помощью логических схем, например, на базе бесконтактных элементов ("Оператор").

В Украине эксплуатируются различные типовые системы дистанционного управления позволяющие осуществлять запуск и остановку любой сложности поточно-транспортные системы.

**7.2. Измельчение.** На рудных обогатительных фабриках применяются барабанные шаровые, стержневые, рудно-галечные мельницы и мельницы самоизмельчения. Для крупного измельчения используются мельницы самоизмельчения и стержневые, работающие обычно в открытом цикле.

Для среднего и тонкого измельчения наибольшее распространение получили шаровые и рудно-галечные мельницы, работающие в замкнутом цикле с классифицирующими устройствами – классификаторами или гидроциклонами.

**7.2.1. Автоматический контроль процесса измельчения.** Эффективность процесса измельчения зависит от ряда входных технологических факторов, число которых определяется видом технологической схемы. К ним следует отнести: расход руды, поступающей в мельницу, циркулирующая нагрузка (песковая нагрузка классификатора), степень загрузки мельницы, расход воды на мельницу, гранулометрический состав измельчаемого продукта, плотность пульпы на сливах. Основные выходные параметры – гранулометрический состав измельченной руды и производительность процесса.

Контроль таких параметров, как расходы руды, воды и пульпы не вызывает трудностей. Для определения циркулирующей нагрузки наибольшее распространение получили методы, основанные на измерении тока или мощности, потребляемых двигателем привода классификатора, так как потребляемая мощность определяется силами сопротивления движению транспортирующего органа классификатора, которые в свою очередь зависят от песковой нагрузки.

Основной недостаток контроля циркулирующей нагрузки по току или мощности состоит в сильной зависимости от технического состояния трущихся поверхностей силовой передачи и зашламленности постели транспортирующего органа.

Степень загрузки мельницы рудой и циркулирующими песками является одним из основных параметров, определяющих ход процесса измельчения. Для оценки степени загрузки используется метод, основанный на измерении шума мельницы в различных частотных диапазонах.

Гранулометрический состав продуктов измельчения желательно измерять непосредственно автоматическими гранулометрами, установленными на сливе классификатора. Учитывая сложность такого контроля, о крупности измельченного материала косвенно судят по плотности слива классификатора. Плотность может быть проконтролирована с помощью манометрических, весовых или радиоизотопных плотномеров.

Плотность пульпы в разгрузочном продукте мельницы измеряется в основном радиоизотопными плотномерами.

Автоматический контроль за состоянием измельчительного оборудования сводится к измерению температуры подшипников и обмоток электродвигателей и контролю за работой системы смазки.

**7.2.2. Автоматизация процесса измельчения.** Разработка схем автоматизации процессов измельчения руд должна отвечать требованиям технологии, которые в основном состоят в стабилизации требуемого гранулометрического состава продукта измельчения и обеспечении максимальной производительности процесса.

В связи с отсутствием надежно действующих автоматических гранулометров первое требование реализуется косвенно – путем стабилизации плотности слива классификатора или гидроциклона.

Учитывая, что на действующих фабриках последующее за измельчением оборудование не особенно приспособлено к переменной нагрузке, второе требование заменяется на стабилизацию потока готового продукта.

В задачу автоматического регулирования многостадийного измельчения входит также распределение нагрузки между стадиями.

В задачу автоматического регулирования многостадийного измельчения входит также распределение нагрузки между стадиями.

На рис. 7.2 показан вариант схемы автоматизации, отвечающий поставленным требованиям, которая включает: АСР загрузки мельницы рудой (система 2), плотности пульпы в мельнице (система 3) и гранулометрического состава слива классификатора (система 4).

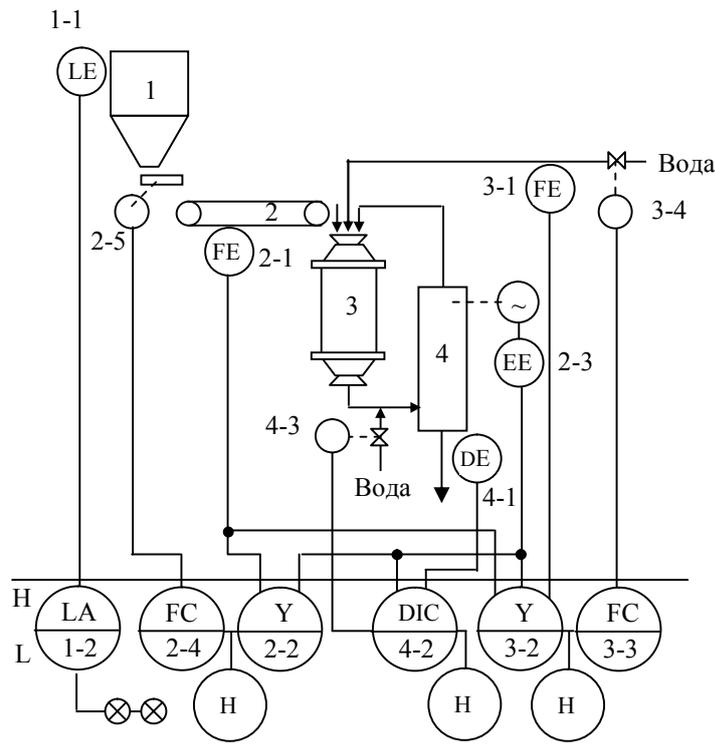


Рис.7.2 - Схемы автоматизации процесса одностадийного измельчения  
1 – бункер; 2 – конвейер; 3 – шаровая мельница; 4 – спиральный классификатор

В АСР загрузки мельницы блок (2-4) служит для суммирования сигналов, пропорциональных расходу руды (датчик 2-1) и циркулирующей нагрузке (датчик 2-3).

С учетом задания (Н) и суммированного сигнала регулирующий блок (2-4) управляет производительностью питателя (2-6), изменяющего нагрузку на мельницу.

Регулирование расхода воды в мельницу осуществляется также с учетом загрузки мельницы рудой, песками и текущим расходом воды (блок 3-2).

Регулирование гранулометрического состава слива классификатора осуществляется путем стабилизации плотности слива с коррекцией по песковой нагрузке (система 4).

На схеме показан и контроль уровня в бункере дробленной руды.

### **7.2.3. Автоматизация процессов магнитного обогащения**

На любой обогатительной фабрике, обогащающей магнетитовые руды, работает большое количество, различным образом включенных магнитных сепараторов, которые с целью упрощения конструкции не имеют никаких регулирующих органов. В связи с этим практически не используют для автоматической регулировки магнитных сепараторов ни частоту вращения барабана, ни напряженность магнитного поля электромагнитных сепараторов.

Известно, что существенным фактором магнитного разделения сильномагнитных руд является плотность питания, однако регулировать ее путем подачи воды в каждый отдельный сепаратор вызывает сложности из-за большого их количества. Данный вопрос можно было бы решить стабилизацией плотности слива предшествующего магнитной сепарации классифицирующего аппарата или подачей дополнительной воды в исходную пульпу. В этом случае одна точка расхода воды может существенно влиять на работу целой группы магнитных сепараторов. Однако, стабилизация плотности слива классифицирующего аппарата приводит к значительным изменениям расхода твердого в сливе, а следовательно, к нестабильному режиму работы магнитных сепараторов. Например, при увеличении крупности и ухудшении измельчаемости исходной руды растет количество песков в классификаторе, уменьшается подача свежей руды в мельницу, следовательно, уменьшается количество пульпы на сливе классификатора, меняется нагрузка на магнитный сепаратор, что приводит к иному перераспределению между качеством и выходом промежуточных продуктов магнитного сепаратора. Еще большее влияние на работу магнитного сепаратора, оказывают колебания содержания магнитного железа в исходной руде.

Трудности, связанные с автоматическим управлением процессом обогащения в развернутых технологических линиях, можно устранить, если определить такие промежуточные регулируемые переменные, которые были бы тесно связаны с конечными показателями процесса обогащения и имели бы довольно небольшие запаздывания относительно регулирующих воздействий. Реализация подобных схем автоматизации связана с использованием вычислительных машин.

### Перечень источников

1. Папушин Ю.Л., Білецький В.С. Основи автоматизації гірничого виробництва. Донецьк: Східний дім. 2007.-168 с.
2. Барский Л.А., Козин В.З.. Системный анализ в обогащении полезных ископаемых. - М.: Недра, 1978.- 486 с.
3. Барский Л.А., Рубинштейн Ю.Б. Кибернетические методы в обогащении полезных ископаемых. - М. Недра, 1970. - 312с.
4. Папушин Ю.Л., Смирнов В.О., Білецький В.С. Дослідження корисних копалин на збагачуваність. Нав. посібник. Донецьк: Східний дім. 2006.-344 с.
5. С.И. Митрофанов, Л.А. Барский, В.Д. Самыгин. Исследование полезных ископаемых на обогатимость.- Уч. пос.- М. :Недра. 1974. 352 с.
6. Методические указания по дисциплине "Компьютерный практикум". Программы обработки данных. Сергеев П.В., ДонНТУ. 2009





