

661.3
K-55

Министерство высшего и среднего специального образования СССР

Московский ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени
химико-технологический институт имени Д. И. Менделеева

На правах рукописи

КОБРИНЕЦ ВИКТОР ПАВЛОВИЧ

**СТАТИСТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ
ПРОЦЕССА ФЛОТАЦИИ КАЛИЙНЫХ РУД**

Специальность 05.17.08.—«Процессы и аппараты химической
технологии. Кибернетика химико-технологических процессов».

Диссертация написана на русском языке

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва — 1974

Работа выполнена на кафедре автоматизации производственных процессов Белорусского технологического института им. С. М. Кирова.

Научные руководители: доктор технических наук, старший научный сотрудник *Л. А. Барский*; кандидат технических наук, доцент *В. Н. Станишевский*.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор *В. В. Шестопалов* (МХТИ имени Д. И. Менделеева), кандидат технических наук, доцент *В. В. Смирнов* (Московский институт стали и сплавов).

Ведущее предприятие — комбинат «Белорускалий» (г. Солигорск, Минская обл.).

Автореферат разослан 21 января 1974 г.

Защита диссертации состоится 26 февраля в 10 час. на заседании Совета № 5 Московского ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени химико-технологического института имени Д. И. Менделеева по адресу: г. Москва, А-47, Миусская площадь, д. 9, аудитория № 436

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Ученый секретарь МХТИ им. Д. И. Менделеева

Г. С. ЗАХАРОВА

661.3

к-515

директивами XXIV с"езда КПСС по 9-ому пятилетнему плану предусматривается увеличение производства калийных удобрений на базе Старобинского месторождения калийных руд в 1,7 раза.

Наряду с вводом новых мощностей дальнейшее повышение рентабельности существующих обогатительных предприятий представляется весьма важной экономической задачей.

По данным обследований, проведенных на комбинате "Белорускалий", перерабатывающем руды Старобинского месторождения, наибольший экономический эффект может быть достигнут в результате повышения извлечения полезного минерала из руды и снижения расходов флотационных реагентов. Поскольку эти показатели зависят прежде всего от качества работы флотационного отделения обогатительной фабрики, основным путем повышения рентабельности является совершенствование управления флотационным процессом и его оптимизация.

3333 up

Флотационный процесс обогащения калийных руд в настоящее время стал основным в производстве калийных удобрений. Перспектива дальнейшего развития этого процесса в применении ко все более низкосортным рудам, возросшая сложность производства, разнообразные внутренние связи и взаимодействия параметров - таковы причины, вызывающие необходимость дальнейшего совершенствования управления процессом флотации калийных руд.

Проблема оптимизации флотационного процесса калийных руд пока еще находится на начальной стадии решения. Флотация является сложным процессом, на результаты которого оказывает влияние большое число независимых и взаимосвязанных факторов. Поэтому оптимизация данного процесса требует прежде всего математического описания, определения и формирования технико-экономического критерия, разработки эффективного алгоритма управления с учетом специфичности флотации, определяемой типом обогащаемой руды с применением схемой обогащения.

На комбинате "Белорускалий" сотрудниками ЦЗЛ и технологами обогатительной фабрики проводится исследование процесса флотации с целью улучшения технологического режима. Однако применяемые классические методы исследований в условиях большого количества переменных и их сложной взаимосвязи не позволяют выработать оптимальный режим.

Процесс стадийной флотации калийных руд в промышленных условиях характеризуется наличием таких технологических режимов, которые невозможно смоделировать в лабораторных и полупромышленных условиях.

В связи с этим для построения математической модели и оптимизации данного процесса возникла необходимость проведения специального исследования промышленного процесса с применением наиболее целесообразных в данных условиях математических методов и ЭВМ.

БИБЛИОТЕКА БТИ
ИМЕНИ С. М. НИРОВА

Реферлируемая работа посвящена вопросам исследования промышленного процесса флотации калийных руд в условиях комбината "Белорускалий" с применением экспериментально-статистических методов, получивших широкое распространение благодаря работам В.В.Налимова, В.В.Кафарова, Г.К.Круга и других, составлению математической модели статики процесса, разработке принципов и алгоритма оптимизации данного многоступенчатого процесса, основные идеи которой заложены в работах В.В.Кафарова, А.И. Бояринова, Г.М.Островского, Ю.М.Волина и других.

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, библиографии и приложения, изложена на 135 страницах машинописного текста с 18 рисунками и 28 таблицами.

Первая глава (Современное состояние исследований по математическому описанию и оптимизации флотационного процесса) является обзорной. В ней рассматриваются общие методы исследования процесса флотации, как вероятностной системы, обосновывается выбор методов идентификации и оптимизации исследуемого процесса, ставится задача исследования.

Процесс флотации характеризуется сложным комплексом механических и физико-химических явлений, протекающих в многофазной среде. Учитывая вероятный характер многих технологических параметров, невозможность контроля некоторых из них, несовершенство разделительных аппаратов и т.д., данный процесс можно считать стохастическим.

С точки зрения идентификации и оптимизации процесс флотации можно отнести к сложным кибернетическим системам и использовать для технологических исследований и оптимизации процесса математический аппарат современной кибернетики: математическую статистику, методы планирования экстремальных экспериментов, математические методы оптимизации и т.д.

Разработка достоверной математической модели процесса может производиться только по статистическим данным, собранным непосредственно на действующем промышленном объекте и во многом определяется рациональным составлением программы активного или пассивного эксперимента с учетом специфических особенностей производственных условий. Такая особенность промышленного процесса флотации как коррелированность его параметров между собой для получения достоверной модели по данным пассивного эксперимента требует применения метода главных компонент.

Использование активных методов при исследовании промышленного процесса флотации возможно и целесообразно, хотя вследствие некоторых ограничений (наличие неуправляемых переменных, малый диапазон варьирования управляемых факторов) следует применять только метод эволюционного планирования. Наиболее целесообразно использование этого метода для исследований элементарного звена процесса флотации (например, одной флотомашины) по несколь-

ким управляющим переменным. Для исследования стадийного процесса флотации, характеризующегося большим количеством факторов, их сложным взаимодействием, необходимо применять методы пассивного эксперимента.

За последние годы появилось много работ, посвященных вопросам математического описания и разработке алгоритмов оптимального управления процессом флотации с применением экспериментально-статистических методов.

Из обзора этих работ следует, что, несмотря на значительные успехи в решении отдельных вопросов, требование повышения точности и достоверности регрессионных уравнений, особенно в условиях коррелированности параметров, вызывает необходимость доработки методики исследований. Также не решена проблема учета неуправляемых переменных и оценки воспроизводимости промышленных флотационных экспериментов при применении эволюционной схемы планирования.

Существующие алгоритмы оптимального управления процессом флотации весьма разнообразны и находятся в основном в стадии теоретических разработок. При этом мало внимания уделено вопросам оптимизации всего флотационного цикла в целом с учетом циркулирующих промпродуктов.

Многочисленные разработки по математическому описанию и оптимизации выполнены в основном для процесса флотации руд черных и цветных металлов и угля. Уровень и темпы работ по аналогичному исследованию процесса флотации калийных руд значительно отстают. Слабая изученность процесса флотации калийных руд как объекта управления выдвигает необходимость проведения специальных исследований по его моделированию и оптимизации.

Основные этапы исследования:

1. Общий анализ задачи оптимизации с учетом специфических особенностей процесса флотации калийных руд; обоснование критерия эффективности.
2. Статистический анализ и разработка достоверной математической модели по всему циклу процесса для анализа его взаимосвязей.
3. Оптимизация параметров технологического режима элементарных звеньев (флотомашин).
4. Разработка моделей и алгоритмов многоступенчатой оптимизации с учетом рециркулирующих потоков для промышленного процесса флотации.
5. Разработка структуры системы управления процессом флотации калийных руд, необходимой для реализации алгоритма оптимизации.

Во второй главе (Анализ процесса флотации на обогатительной фабрике комбината "Белорускалий" как объекта оптимизации) исходя из особенностей технологии и схемы флотации калийных руд анализируется состояние управления процессом, формулируются основные задачи его оптимизации, выбирается

критерий эффективности.

Существенной особенностью исследуемого процесса является то, что все компоненты исходной руды (за исключением нерастворимого остатка – глины) – растворимые соли и процесс ведется в насыщенном растворе KCl и $NaCl$.

Эти особенности вызывают дополнительные трудности как при управлении процессом, так и при его экспериментальном исследовании.

Технологическая схема состоит из основной и трех перерасчетных операций (рис. I).

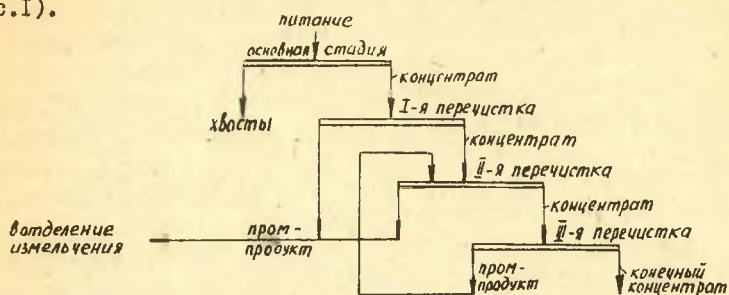


Рис. I. Технологическая схема процесса флотации калийных руд

Анализ методов управления процессом флотации калийных руд показал, что, несмотря на некоторое саморегулирование за счет циркулирующих промпродуктов, в ряде случаев технологические режимы процесса значительно отличаются от оптимальных. Отсутствие оперативного контроля параметров исходной пульпы, погрешности визуальной оценки, а также невозможность стабилизации возмущающих факторов приводит к неоптимальному ведению процесса особенно при ручном управлении, когда флотатор не успевает, а зачастую и не может учесть изменения нескольких десятков параметров, влияющих на его результаты.

Вовлечение в переработку более бедных калийных руд, увеличивающиеся требования к качеству концентратов приводят к усложнению схем обогащения, увеличению количества операций и номенклатуры применяемых реагентов. При этом ручное управление становится все менее эффективным, а потери от ведения процесса в неоптимальном режиме возрастают.

Задача оптимизации процесса флотации калийных руд формулируется следующим образом.

Состояние непрерывного технологического процесса флотации калийных руд в произвольный момент времени определяется функцией вектора выходных переменных $\bar{Y} = (Y_1, \dots, Y_n)$, определяющих качество готовой продукции, входных переменных $\bar{X} = (X_1, \dots, X_n)$ и управляющих воздействий $\bar{M} = (M_1, \dots, M_k)$. Зависимость $\bar{Y} = f(\bar{X}, \bar{M})$ является математической моделью процесса, а $E = \varphi(\bar{X}, \bar{M}, \bar{Y})$ – функцией цели (критерием оптимальности) процесса, выраженной через параметры технологического режима.

Для осуществления оптимального управления необходимо по известным X_i из области $X_{imin} \leq X_i \leq X_{imax}$ найти такие $M_i = M_{ionm}$, удовлетворяющие соотношениям $M_{imin} \leq M_{ionm} \leq M_{imax}$ при которых выполняется условие $Y_{imin} \leq Y_i \leq Y_{imax}$ и $E = \text{extrem}$, т.е. алгоритм управления представляет собой совокупность функций $M_{ionm} = h_{ionm}(X)$.

Для крупнотоннажного непрерывного процесса флотации калийных руд основными возмущающими воздействиями являются характеристики исходной руды (содержание KCl и нерастворимого остатка). Поскольку среднее время между существенными изменениями этих параметров, как правило, значительно больше постоянной времени процесса флотации калийных руд, то задача оптимизации данного процесса, в первом приближении является статической, т.е. ограничена рамками оптимизации по заданному критерию статического режима процесса в каждый момент времени, исключая переходный динамический режим. Наиболее общий и приемлемый путь решения данной задачи - достижение минимума себестоимости концентрата при определенных ограничениях его качества и заданной производительности:

$$\begin{aligned} C_k &= f(\Pi_i) \rightarrow \min; \\ A &\geq A_{план}; \\ B &= B_{зад}. \end{aligned} \quad (I)$$

где: C_k - себестоимость готовой продукции (концентрат),
 Π_i - параметры процесса, влияющие на себестоимость,
 A - производительность,
 B - содержание KCl в концентрате.

В связи с трудностью определения количественных оценок C_k в конкретных условиях управления процессом флотации калийных руд, критерий (I) практически неприменим. Поэтому на базе экономического критерия (I) был определен более приемлемый технологический критерий эффективности для управления процессом флотации калийных руд:

$$\begin{aligned} \xi &= f_2(\Pi_i) \rightarrow \max; \\ A &= A_{план}; \\ B &= B_{зад}. \end{aligned} \quad (2)$$

ξ - извлечение KCl в концентрат.

Критерий (2) также согласуется с принципом построения алгоритма управления многостадийным процессом флотации калийных руд, так как является универсальным и имеющим одинаковый технологический смысл для всех стадий.

В третьей главе (Статистический анализ и моделирование процесса флотации калийных руд) проводится статистическое исследование параметров и режимов процесса, корреляционный анализ, ранжирование параметров по степени их влияния на процесс. Основная задача, решаемая в главе - построение математической модели, которая бы точно отражала свойства исследуемого про-

цесса в диапазоне возможных рабочих режимов по всему циклу процесса.

Для статического исследования и моделирования процесса был поставлен специальный эксперимент по методу пассивного наблюдения по разработанной методике. Программа эксперимента включала 22 контролируемых параметра по всему циклу процесса флотации калийных руд: содержание КСІ (X_1), нерастворимого остатка (X_2), класса крупности - 0,8 мм (X_3) в питании флотации; объемный расход пульпы на флотацию (X_5); плотность питания (Ж/Т) основной (X_4), первой перечистной (X_7), второй перечистной (X_{10}) и третьей перечистной (X_{15}) стадий; содержание КСІ в концентрате основной (X_6), первой перечистной (X_8), второй перечистной (X_{13}) и третьей перечистной (X_2) стадий; содержание КСІ в питании второй перечистной стадии (X_{11}), содержание КСІ в хвостах основной (X_3) и промпродуктах первой перечистной (X_9), второй перечистной (X_{14}) и третьей перечистной (X_{19}) стадий; уровень пульпы в основной (X_{18}), первой перечистной (X_{20}) и второй перечистной (X_{12}) стадиях; расходы реагентов: аминов (X_{16}), тилозы (X_{17}).

При обработке данных эксперимента определены оценки статистических характеристик параметров: средние значения, дисперсии, коэффициенты вариации, а также статистические характеристики распределения параметров: эмпирические и теоретические вероятности и плотности вероятностей, по которым были построены дифференциальные и интегральные кривые распределения. Проверка на нормальность закона распределения исследуемых параметров проводилась по критерию Колмогорова, по показателям асимметрии и эксцесса.

Большинство параметров процесса, за некоторым исключением, подчиняются нормальному закону распределения. Это дает возможность применить методы корреляционного и регрессионного анализа.

Оценка степени колеблемости параметров (по коэффициенту вариации) и времени выдерживания параметра в технологической норме (по интегральной кривой распределения) позволила выявить "узкие места" процесса. Так, например, режимные параметры процесса относительно стабильны; наиболее сильными колебаниям подвержено содержание КСІ в промпродуктах (от 33 до 84%) и хвостах (51%), что свидетельствует о несовершенстве ручного управления процессом. Некоторые параметры (например, содержание КСІ в хвостах, содержание класса - 0,8 мм в питании флотации, Ж/Т I-II перечистки) не выдерживаются значительное время в пределах технологической нормы.

По статистическим данным результатов эксперимента на ЭВМ рассчитаны матрицы коэффициентов парной корреляции и частных коэффициентов корреляции. Проведенный корреляционный анализ параметров и выходных показателей процесса позволил оценить тесноту связи между всеми параметрами и показателями процесса. Используя задачу о "лидере" из теории графов, проведено последо-

вательное ранжирование факторов с помощью определения степени связности каждого фактора с другими по величине итерированной силы. Установлен следующий убывающий порядок влияния параметров на процесс: содержание КСІ в концентрате І-й перерешетки, уровень пульпы во флотомашинах І-й перерешетки, содержание КСІ в концентрате основной и Ш-й перерешеток, т.е. "лидирующую" роль играет качество концентратов стадий процесса.

Вследствие коррелированности параметров процесса и действия ненаблюдаемых факторов для получения достоверной математической модели по всему циклу процесса (с количеством независимых переменных X_i равным 20) применен метод главных компонент. Методика построения математической модели процесса по данным пассивного эксперимента с применением метода главных компонент, развитая в работах В.В.Налимова и его сотрудников, состояла в следующем:

1. Определение некоторого числа таких независимых линейных функций (компонент) (U_k) входных параметров (X_i), через которые наилучшим образом описывается изменчивость режимов во время наблюдений.

$$U_k = \sum_{i=1}^n a_{ik} X_i \quad (3)$$

($k = 1, 2, \dots, p$),

где: a_{ik} - нагрузка i -й переменной в k -й компоненте.

2. Составление регрессионных уравнений над этими линейными функциями (U_k) с включением в уравнение только значимых по t -критерию коэффициентов.

$$y_j = \sum_{k=1}^p b_{jk} U_k \quad (4)$$

($j = 1, 2, \dots, m$),

где: b_{jk} - коэффициент регрессии по k -ой компоненте.

При этом b_{jk} - некоррелированные случайные величины вследствие ортогональности главных компонент.

По данной методике с помощью ЭВМ "БЭСМ-4" были построены регрессионные уравнения на главных компонентах для процесса флотации калийных руд относительно показателей: Y_1 - извлечение КСІ в конечный концентрат, Y_2 - содержание КСІ в конечном концентрате.

$$Y_1 = 88,46 - 1,61U_4 - 2,20U_{10} + 1,05U_2 - 2,12U_{13} + 1,94U_5 \quad (5)$$

$$Y_2 = 92,99 + 0,88U_1 + 1,19U_{13} + 0,74U_8 - 0,55U_5 - 0,96U_{17} \quad (6)$$

В уравнениях (5) и (6) компоненты U_k расположены в порядке убывания значения t -критерия для коэффициентов при них.

По уравнениям (5) и (6) и по нагрузкам компонент оценена степень влияния переменных X_i на показатели процесса Y_1 и Y_2 , сделаны выводы о взаимосвязях процесса и даны рекомендации по его улучшению. Одновременное рассмотрение уравнений (5) и (6) позволило учесть антагонистический характер показателей процесса Y_1 и Y_2 в части влияния на них одних и тех же переменных X_i . Большинство управляемых переменных (уровни пульпы, Ж/Т перечистных стадий, расход аминов) оказывает разнонаправленное действие на показатели процесса. Поэтому возникла необходимость решения компромиссной задачи для обоих показателей процесса с целью определения наилучших (оптимальных) значений управляемых переменных процесса.

В четвертой главе (Математическое описание режима работы флотомашин при флотации калийных руд методом эволюционного планирования эксперимента) изложены особенности методики применения метода эволюционного планирования эксперимента в промышленных условиях, с помощью данного метода исследуется влияние на показатели работы первых двух флотомашин основной стадии управляемых параметров, определяющих гидравлический режим в них, проводится оптимизация данных режимов.

Переменные элементарного звена процесса флотации (одной флотомашин) классифицированы на следующие группы: 1) регулируемые: X_1 - скорость вращения импеллеров, X_2 - уровень пульпы во флотомашине, X_3 - плотность питающей пульпы; 2) неуправляемые и нерегулируемые (в данном эксперименте): X_4 - содержание КСІ в руде, X_5 - объемный расход пульпы, $X_{ОДА}$ - расход аминов и $X_{КМЦ}$ - титловз; 3) возмущающие (неконтролируемые); 4) выходные параметры: E - извлечение КСІ в концентрат, β - содержание КСІ в концентрате.

Особенность методики применения метода эволюционного планирования для решения поставленной задачи состояла в учете неуправляемых переменных X_q , оценка влияния которых на величину выходных показателей процесса E_p необходима для анализа воспроизводимости эксперимента и математического описания режима работы флотомашин.

Благодаря этому математическую модель процесса, полученную при эволюционном планировании относительно управляющих переменных, можно уточнить, дополнив ее членами, линейно зависимыми от неуправляемых переменных

$$E_p = \theta_0 + \theta_1 X_1 + \dots + \theta_q X_q + \dots + \theta_{q+1} X_q X_{q+1} + \dots + \theta_l \theta_l \quad (7)$$

где: θ_l - коэффициенты регрессии по неуправляемым переменным X_q , определяемые по методике А.З.Иванова, т.е.

$$\theta_l = \frac{\sum_{j=1}^n \theta_l^j \theta_l^j}{\sum_{j=1}^n (\theta_l^j)^2} \quad (8)$$

K - количество циклов эволюционного планирования;
 N - количество вариантов условий управления в цикле.

$$E_{\eta} = \frac{\sum_{i=1}^N X_{\eta} \Delta X_{\eta}}{\Delta X_{\eta \max}} \quad (9)$$

$M [X_{\eta}]$ - математическое ожидание случайной величины X_{η} , осредненное по фазе планирования.

$\Delta X_{\eta \max}$ - максимальное отклонение переменной X_{η} от $M [X_{\eta}]$.

Опыты эволюционного планирования начинались на I-й флотомашине и проводились согласно матрице полного факторного эксперимента для 3-х переменных (X_1, X_2, X_3) с нулевой (центральной) точкой.

Всего было проведено 5 циклов эволюционного планирования, в ходе которых регистрировались не только величины E_{η}^{I} и β_{η}^{I} выходных параметров, но и величины неуправляемых переменных X_{η} . Учет переменных X_{η} позволил невоспроизводимый относительно управляемых переменных эксперимент обратить в квазивоспроизводимый и получить адекватные уравнения математической модели для первой флотомшины:

$$E_I = 87,83 - 4,43X_1 + 1,82X_2 + 1,3X_3 + 1,5X_1X_2 - 6,84E_{\eta} \quad (IO)$$

$$- 0,85E_{\eta}^{I} + 0,76E_{\eta}^{II} - 4,62E_{\eta}^{III};$$

$$\beta_{I1} = 79,60 - 2,55X_1 - 4,78X_2 + 1,11X_3 + 0,59X_1X_2 \quad (II)$$

$$+ 0,31E_{\eta}^{I} + 0,08E_{\eta}^{II} + 0,61E_{\eta}^{III} - 0,40E_{\eta}^{IV};$$

Кроме анализа взаимосвязей процесса уравнения (IO) и (II) использовались для оптимизации режима работы флотомшины по управляемым параметрам, предусматривающей определение максимума целевой функции - извлечения КСІ в концентрат (IO) при заданном значении его качества (II). Эта задача была решена с приемлемой точностью методом перебора вариантов сочетаний факторов X_1, X_2, X_3 (в пределах интервала их варьирования) по вычисленным значениям параметров оптимизации E_I и β_I для нескольких вариантов значения качества концентрата β_{I1} . В результате был определен следующий оптимальный гидравлический режим в I-й флотомашине: $X_1 = 192$ об/мин, $X_2 = +25$ мм (выше базового), $X_3 = 2,45$ при $\beta_{I1} = 78\%$ $E_{\eta \max} = 97,08\%$.

После экспериментальной проверки, которая подтвердила данные результаты, этот режим был внедрен в производство, что дало повышение извлечения на I-й флотомашине основной стадии в среднем на 3,5%. Экономический эффект при этом составил 56 тыс. руб. в год.

После реализации оптимального режима на I-й флотомашине аналогичное исследование проведено на следующих двух флотокамерах, т.е. на 2-й флотомашине основной стадии флотации, по двум управляемым переменным: X_1' - скорости вращения импеллеров и X_2' - уровню пульпы во флотомашине. Контролировались также неуправляемые в эксперименте переменные X_2'' , $X_{\text{ОДА}}'$, $X_{\text{КМЦ}}'$. Программа цикла задавалась матрицей полного факторного эксперимента

для двух переменных с нулевой (центральной) точкой.

На основании обработки результатов эксперимента получены следующие уравнения регрессии относительно извлечения КСІ в концентрат 2-й флотомашини (E_2) и содержания КСІ в нем (β_2), включающие все управляемые и контролируемые переменные.

$$E_2 = 24,35 + 4,0Z'_1 - 3,38E'_{кнз} + 4,14E'_{оаа} \quad (I2)$$

$$\beta_2 = 65,14 - 1,8Z'_1 - 10,63Z'_2 + 1,63d'_1Z'_2 + 4,74E'_2 - \\ - 4,75E'_{кнз} + 5,53E'_{оаа} \quad (I3)$$

Проверка уравнений (I2) и (I3) на адекватность дала положительный результат. На основании уравнения (I3) определен наилучший режим работы 2-й флотомашини по управляемым переменным: $Z'_1 = 160$ об/мин, $Z'_2 = -25$ мм (относительно базисного) при $E_2 = 24,36\%$ и $\beta_2 = 73,20\%$. Данный режим после экспериментальной проверки также внедрен в производство.

В пятой главе (Оптимизация процесса флотации калийных руд с применением метода динамического программирования) с учетом особенностей схемы флотации производится выбор метода и разработка алгоритма статической оптимизации.

Как наиболее эффективный в данных условиях выбран метод динамического программирования. Для оптимизации многоступенчатого с рециркулируемыми потоками процесса флотации калийных руд (рис.2) разработана специальная методика, основанная на идеях, изложенных в работах В.В.Кафарова и А.И.Бояринова.

Разработка математической модели процесса флотации калийных руд для его многоступенчатой оптимизации включала следующие этапы: декомпозиция технологического процесса на единичные стадии; выбор целевой функции, входных, выходных и управляющих параметров на каждой ступени процесса; разработка методики моделирования выходных параметров процесса, а также целевой функции с входными и управляющими: расчет по статистическим данным уравнений связи для всех ступеней процесса.

Представляя процесс флотации как многоступенчатый (рис.2) и, выделив из него какую-либо i -стадию, можно охарактеризовать ее следующими вектор-параметрами:

$\bar{X}^{(i-1)}$ - вектор совокупности параметров входа в i -ю стадию, являющийся выходом предыдущей $i-1$ стадии;

$\bar{X}^{(i)}$ - вектор совокупности параметров выхода i -й стадии, являющийся входом в $i+1$ ступень;

$\bar{U}^{(i)}$ - вектор совокупности управляющих параметров i -й стадии;

$\bar{Y}_0^{(i)}$ - вектор совокупности параметров, являющихся отходами на i -й стадии.

Наименования технологических параметров, входящих в состав векторов, при-

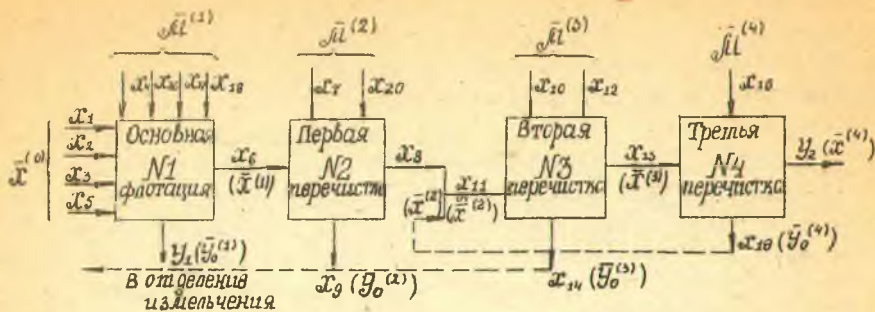


Рис. 2 Структурная схема процесса флотации калийных руд

ведены в главе 3.

Скалярная величина z_i , характеризующая эффективность работы i -й стадии, называется целевой функцией. В общем виде:

$$z_i = z_i(\bar{x}^{(i-1)}, \bar{x}^{(i)}, \bar{y}_0^{(i)}, \bar{\mu}^{(i)}). \quad (14)$$

При применении метода динамического программирования модель i -й стадии представляется системой уравнений:

$$\bar{x}^{(i)} = \varphi^{(i)}(\bar{x}^{(i-1)}, \bar{\mu}^{(i)}). \quad (15)$$

$$\bar{y}_0^{(i)} = \psi^{(i)}(\bar{x}^{(i-1)}, \bar{\mu}^{(i)}). \quad (16)$$

Уравнение целевой функции с учетом математического описания i -й стадии можно представить как:

$$z_i = z_i(\bar{x}^{(i-1)}, \bar{\mu}^{(i)}). \quad (17)$$

Зависимости (17), (16) для каждой стадии процесса, а также зависимость

$$\bar{x}^{(2)} = f(\bar{x}^{(1)}, \bar{y}_0^{(1)}). \quad (18)$$

необходимые при решении задачи оптимизации, получены методом регрессионного анализа на основе статистических данных пассивного эксперимента. При выборе форм связи для зависимостей (15), (16), (17), (18) были исследованы различные виды регрессий (линейных и нелинейных) с выбором уравнений, обладающих минимумом остаточной дисперсии (максимумом F -критерия).

Основной особенностью процесса флотации калийных руд как объекта многоступенчатой оптимизации является наличие неуправляемого рециркулируемого потока, подаваемого в виде промпродукта с выхода стадии 3-й перечистки (№4) на вход стадии 2-й перечистки (№3).

Применение приемов оптимизации по методу динамического программирования в этих условиях возможно при выполнении следующих предпосылок: наличие данного рецикла не изменяет общего характера зависимости состояния выхода стадии 2-й перечистки - $\bar{X}^{(3)}$, от управления на ней $\bar{u}^{(3)}$, от управления на ней $\frac{\partial \bar{u}^{(3)}}{\partial \bar{x}^{(2)}, \bar{u}^{(2)}}$, тематически это эквивалентно требованию, чтобы знак производной $\frac{\partial \bar{u}^{(3)}}{\partial \bar{x}^{(2)}, \bar{u}^{(2)}}$, определенной для процесса без рецикла, совпадал со знаком производной $\frac{\partial \bar{u}^{(3)}}{\partial \bar{x}^{(2)}, \bar{u}^{(2)}}$, определяемой с учетом рецикла.

$\bar{x}^{(3)}(\bar{x}^{(2)}, \bar{u}^{(2)})$ и $\bar{x}^{(2)}(\bar{x}^{(1)}, \bar{u}^{(1)})$ - математическое описание стадии № 3 относительно выходного параметра соответственно без учета и с учетом рецикла. Анализ этих предпосылок привел к положительным результатам, что дало возможность использовать без ограничений методику оптимизации многостадийного с рециклом процесса флотации калийных руд по методу динамического программирования. Эта методика состояла в применении для последовательного анализа стадий процесса рекуррентного соотношения:

$$f_N(\bar{x}^{(n)}) = \max \{ z_n(\bar{x}^{(n)}, \bar{u}^{(n)}) + f_{N-1}(\bar{x}^{(n-1)}, \bar{u}^{(n-1)}) \}. \quad (19)$$

где: $f_N(\bar{x}^{(n)})$ - максимальное значение критерия $R_N = \sum_{i=1}^N z_i$, которое можно получить при использовании оптимальной стратегии управления всеми стадиями процесса $\bar{u}_{opt} = (\bar{u}_{opt}^{(1)}, \bar{u}_{opt}^{(2)}, \dots, \bar{u}_{opt}^{(n)})$.

1. Рекуррентное соотношение для стадии № 4 (3 перечистка), с которой, согласно методу, начинается оптимизация:

$$f_4(\bar{x}^{(3)}) = \max z_4(\bar{x}^{(3)}, \bar{u}^{(4)}). \quad (20)$$

Выражение (20) - это целевая функция ступени № 4 - извлечение КСИ в концентрат от 3-й перечисточной стадии.

Для каждого значения вектора стадии $\bar{X}^{(3)}$ определяются такие значения управлений на стадии $\bar{u}^{(4)}$, при которых достигался максимум выражения (20), при выполнении ограничений на вектора $\bar{X}^{(4)}$ и $\bar{y}_0^{(4)}$. В результате определялись зависимости:

$$\bar{u}_{opt}^{(4)} = \bar{u}^{(4)}(\bar{x}^{(3)}). \quad (21)$$

$$f_4 = f_4(\bar{x}^{(3)}). \quad (22)$$

С использованием математического описания стадии № 4 определялись зависимости:

$$\bar{x}_{opt}^{(4)} = \bar{x}^{(4)}(\bar{x}^{(3)}). \quad (23)$$

$$\bar{y}_{0,opt}^{(4)} = \bar{y}_0^{(4)}(\bar{x}^{(3)}). \quad (24)$$

при оптимальном управлении на стадии № 4.

2. На следующем этапе выполнялся совместный анализ ступеней 3-й и 2-й переливочной (стадий № 4 и 3), для которых рекуррентное соотношение имеет вид:

$$f_3 = (\bar{X}^{(2)}) \cdot \max \{ \gamma_3(\bar{X}^{(2)}, \bar{M}^{(3)}) \cdot f_2[\gamma^{(3)}(\bar{X}^{(2)}, \bar{M}^{(3)})] \}. \quad (25)$$

Цель оптимизации на данном этапе состояла в нахождении для каждого $\bar{X}^{(2)}$ максимума выражения (25) и соответствующего ему $\bar{M}_{\text{опт}}^{(3)}$, а по математическому описанию стадии № 3 - значений параметров стадии $\bar{X}^{(3)}$ и параметров отходов на данной стадии $\bar{Y}_0^{(3)}$. Таким образом, в результате данного этапа получены зависимости:

$$f_2 = f_2(\bar{X}^{(2)}). \quad (26)$$

$$\bar{M}_{\text{опт}}^{(3)} = \bar{M}^{(3)}(\bar{X}^{(2)}). \quad (27)$$

$$\bar{X}^{(3)}_{\text{опт}} = \bar{X}^{(3)}(\bar{X}^{(2)}). \quad (28)$$

$$\bar{Y}_0^{(3)}_{\text{опт}} = \bar{Y}_0^{(3)}(\bar{X}^{(2)}). \quad (29)$$

Учет рециркулируемого потока производился следующим образом.

При помощи полученных ранее зависимостей (28) и (24) определялась зависимость $\bar{Y}_0^{(2)}_{\text{опт}} = \bar{Y}_0^{(2)}(\bar{X}^{(2)})$, подстановка которой в выражение (18), являющееся математической моделью узла смешения рециркулируемого потока с выходом стадии № 2, позволила определить зависимость выхода стадии № 2 от состояния входа стадии № 3 при оптимальном управлении на стадиях № 3 и № 4, т.е.

$$\bar{X}^{(2)} = \bar{X}^{(2)}(\bar{X}^{(3)}). \quad (30)$$

С учетом выражения (30) зависимости (26), (27) и (28) пересчитывались относительно выхода стадии № 2 - $\bar{X}^{(2)}$ и таким образом, определение оптимальных управлений $\bar{M}_{\text{опт}}^{(3)}$, а также выполнение дальнейших этапов оптимизации производились непосредственно по состоянию выхода стадии № 2 без учета рециркулируемого потока.

Дальнейшие этапы оптимизации процесса проводились путем анализа рекуррентного соотношения последовательно для стадий I-й переливочной (№ 2) и основной флотации (№ 1), в результате чего на стадиях определялись максимальные значения обобщенных целевых функций соответствующих ступеней $f_3(\bar{X}^{(2)})$ и $f_4(\bar{X}^{(1)})$ и соответствующие им оптимальные управления $\bar{M}_{\text{опт}}^{(2)}$ и $\bar{M}_{\text{опт}}^{(1)}$, а по математическим описаниям стадий - значения выходных параметров стадий $\bar{X}^{(2)}$ и $\bar{X}^{(1)}$ при оптимальном управлении на них. Так как выход стадии № 1 - $\bar{X}^{(1)}$ является входом в стадию № 2, то с использованием данной методики становится возможным найти оптимальные управления на каждой из ступеней, при которых достигается максимум извлечения от всего флотационного процесса.

По данному алгоритму и методике составлена блок-схема программы оптимизации процесса. Ввиду небольшой размерности векторов входов $\bar{X}^{(i-1)}$ и управлений $\bar{u}^{(i)}$, поиск максимума целевой функции на каждой стадии осуществляется по сетке переменных.

На все технологические параметры процесса заданы ограничения, причем на такие важнейшие показатели, как содержание КСІ в хвостах ($\bar{y}_0^{(2)}$) и в конечном концентрате ($\bar{X}^{(4)}$) они следующие: $0,9\% \leq \bar{y}_0^{(1)} \leq 2,5\%$, $93\% \leq \bar{X}^{(4)} \leq 95\%$.

В соответствии с блок-схемой алгоритма оптимизации была составлена и реализована на ЭЦВМ "Минск-22" программа. По ней проведен расчет оптимальных управляющих параметров и показателей процесса для 40 вариантов значений входных переменных $\bar{X}^{(0)}$, взятых из данных экспериментального исследования процесса. Это позволило сравнить данные по расчетным оптимальным режимам и режимам нормальной эксплуатации. Сравнение данных по обоим режимам показало, что оптимизацией процесса по предлагаемому методу достигается существенное увеличение извлечения КСІ в концентрат (на 5,6%) при заданных кондициях на конечный концентрат.

Наибольший эффект оптимизации достигается в основной стадии флотации за счет сокращения потерь КСІ с отходами на 1,7% и уменьшения расхода дорогостоящего реагента - тилозы. При этом прогнозируемый годовой экономический эффект (без учета экономии реагентов) для обогатительной фабрики I-го рудоуправления комбината "Белорускалий" составляет 474 тыс. руб., что делает экономически целесообразным создание системы оптимального управления процессом флотации калийных руд с применением ЭВМ и предлагаемого алгоритма.

Выбор структуры оптимального управления процессом исследования показал, что наиболее рациональной является комбинированная система оптимального управления, включающая ЭВМ и состоящая из разомкнутой части, реализующую оптимальную стратегию управления процессом по методу динамического программирования, и замкнутой части, выполняющей функцию корректора математической модели.

Для корректировки математической модели, как наиболее эффективный для процесса флотации калийных руд, принят итеративный алгоритм по методу стохастических аппроксимаций. С учетом взаимосвязи и последовательности решения задачи оптимизации разработана структурная схема алгоритма функционирования системы оптимального управления процессом флотации калийных руд.

При разработке алгоритма коррекции математической модели процесса флотации калийных руд уравнения связи стадий процесса вида (I5+I6), в общем случае сводились к полиному второй степени:

$$y_s = \sum_{i=1}^{m_i} a_i x_i + \sum a_{ij} x_i x_j + a_0. \quad (31)$$

Уравнение (31) преобразовывалось в полином вида:

$$y_s = \sum_{k=1}^{m_k} d_k z_k \quad (32)$$

где:

$$z_k = \{x_1, \dots, x_{m_i}, x_1 x_1, \dots, x_1 x_{m_i}, x_2 x_2, \dots, x_2 x_{m_i}, \dots, x_{m_i} x_{m_i}, 1\}; \quad (33)$$

$$d_k = \{a_1, \dots, a_{m_i}, a_{11}, \dots, a_{1m_i}, a_{22}, \dots, a_{2m_i}, \dots, a_{m_i m_i}, a_0\}; \quad (34)$$

$$m_k = m_i + \frac{m_i(m_i+1)}{2} + 1; \quad (35)$$

m_i - количество независимых переменных в уравнении связи.

Адаптация коэффициентов полинома (32) производится по рекуррентным формулам:

$$d_k^n = d_k^{n-1} + \frac{y_s^n - \sum_{k=1}^{m_k} d_k^{n-1} z_k^n}{\lambda \sum_{k=1}^{m_k} (z_k^n)^2} z_k^n. \quad (36)$$

где: n - номер очередного шага коррекции;
 y_s^n - фактическое значение S -го выходного показателя на n -ом шаге рекуррентной процедуры;
 λ - параметр алгоритма.

Для определения λ на ЦВМ было проведено моделирование уточнения коэффициентов некоторых уравнений связи с использованием начального приближения этих уравнений и данных нормальной эксплуатации объекта. Результаты моделирования для $\lambda = 1; 2; 3; 5$ показали, что наилучшая сходимость итерационной процедуры для исследуемого процесса достигается при $\lambda = 2$.

С учетом особенностей построения адаптивной модели процесса флотации калийных руд, разработана блок-схема программы коррекции математической модели данного объекта с применением ЦВМ.

В приложении приведены результаты пассивного эксперимента по исследованию процесса флотации калийных руд, методика расчета некоторых параметров и показателей процесса, результаты циклов эволюционного планирования эксперимента по исследованию режимов работы флотомашин и их обработка. Дано описание функций блоков блок-схем программы оптимизации процесса флотации калийных руд и коррекции его математической модели. Приведены акты о внедрении оптимальных режимов флотомашин с расчетом экономической эффективности и использовании результатов разработок в составе технического проекта по теме "АСУ -Билорускалий".

ВЫВОДЫ

1. Промышленный процесс флотации калийных руд характеризуется наличием большого числа технологических факторов, различного рода возмущений и вероятностным характером, что позволяет рассматривать этот процесс как кибернетическую систему, которая может исследоваться и описываться количественно с применением экспериментально-статистических методов.

2. В качестве критерия эффективности протекания процесса выбрано извлечение КС1 в концентрат при заданном содержании КС1 в нем.

Наиболее целесообразный алгоритм управления процессом – компенсация изменений входных параметров с целью достижения максимума критерия эффективности. Задача оптимизации процесса ограничена рамками статической оптимизации.

3. Статистический анализ параметров процесса флотации калийных руд, проведенный по данным специального опробования, позволил определить характеристики распределений параметров, оценить степень их колеблемости и выявить "узкие места" процесса.

4. Корреляционный анализ параметров процесса показал наличие и тесноту связей и позволил дать технологическую интерпретацию степени соответствия в изменениях параметров. В результате ранжирования факторов процесса, проведенного методом поиска "лидера" из теории графов по матрице коэффициентов парной корреляции, установлен порядок влияния факторов на процесс.

5. Технологическая интерпретация математической модели процесса, полученной методом главных компонент, позволила оценить степень влияния параметров процесса на выходные показатели, сделать основные выводы о его взаимосвязях и дать рекомендации по улучшению его показателей. При этом показано, что ввиду разнонаправленного действия многих управляющих факторов на оба показателя процесса, необходима его оптимизация.

6. Методом эволюционного планирования эксперимента с учетом неуправляемых переменных статистически исследованы гидравлические режимы флотомашин основной стадии флотации. Полученные математические модели двух флотомашин основной стадии флотации по неуправляемым и управляемым переменным использовались для расчета оптимальных режимов флотомашин.

7. Разработана методика математического моделирования процесса при его многоступенчатой оптимизации, на основании которой получена математическая модель процесса, необходимая для реализации метода динамического программирования. Нестационарные изменения характеристик объекта вызывают необходимость коррекции математической модели процесса флотации с использованием итеративного алгоритма по методу стохастической аппроксимации. Разработана блок-схема алгоритма оптимизации процесса флотации калийных руд по методу динамического программирования с учетом рециркулируемых

потоков и блок-схема алгоритма коррекции математической модели данного процесса.

8. Проведение на ЭВМ "Минск-22" расчеты оптимальных режимов и показателей процесса для 40 вариантов конкретных значений входных параметров показали, что оптимизацией по предлагаемому алгоритму достигается увеличение извлечения КСІ в среднем на 5,6%, (что эквивалентно увеличению выхода концентрата на 1,3%) при сокращении расходов дорогостоящих реагентов. Прогнозируемый годовой экономический эффект, который может быть достигнут при оптимизации процесса по данному алгоритму за счет сокращения потерь КСІ с отходами (без учета снижения расхода реагентов) на одной обогатительной фабрике комбината "Белорускалий" равен 470 тыс.руб.

9. Экономически и технически целесообразно создание системы оптимального управления процессом флотации калийных руд с применением ЭВМ и предлагаемого алгоритма управления. С учетом особенностей процесса флотации калийных руд как объекта управления разработана рациональная структурная схема системы оптимального управления процессом с применением ЦВМ.

По результатам данной работы разработаны техническое задание и технический проект по задаче "Управление процессом флотации" в системе "АСУ-Белорускалий".

По теме диссертационной работы опубликованы следующие статьи.

1. Станишевский В.Н., Кобринец В.П., Папок Е.В. Математическое описание и оптимизация процесса флотации калийных руд в промышленных условиях I СГКК. Сб. "Флотация растворимых солей". Изд. "Наука и техника", Минск, 1971.

2. Кобринец В.П., Станишевский В.Н., Папок Е.В. Оптимизация режима флотомашин при флотации калийных руд в промышленных условиях. Изв. Вузов, "Горный журнал", №3, 1972.

3. Барский Л.А., Голосов О.В., Кобринец В.П., Станишевский В.Н., Томингас К.В. Выбор оптимальных параметров элементов флотационного разделительного каскада. Изв. Вузов, "Горный журнал", №3, 1973.

4. Кобринец В.П., Станишевский В.Н., Папок Е.В. Статистический та кореляційний аналіз процесу флотації калійних руд. Сб. "Застосування математичної статистики в машинобудуванні та приладобудуванні", "Свявння", Київ, 1973.

5. Ползик П.В., Станишевский В.Н., Кобринец В.П. Анализ технологического процесса обогащения калийных солей и пути его автоматизации на I-ом Солигорском калийном комбинате. Тезисы докладов VI Все

3333 ар

союзной конференции по технологии неорганических веществ и минеральных удобрений. Тбилиси, 1968.

6. Кобринец В.П., Станишевский В.Н., Папок Е.В. Об одном методе поиска оптимального гидравлического режима флотации в производственных условиях I-го Солигорского калийного комбината. Тезисы УП Всесоюзной конференции по технологии неорганических веществ и минеральных удобрений. Минск, 1970.

7. Кобринец В.П., Станишевский В.Н., Папок Е.В. Исследование основных возмущающих воздействий процесса флотации калийных руд. Тезисы докладов семинара "Автоматический контроль и управление производственными процессами в химической и деревообрабатывающей промышленности", Минск, 1973.

8. Кобринец В.П., Андрукович П.Ф., Станишевский В.Н. Статистическое моделирование процесса флотации калийных руд. Тезисы докладов семинара "Автоматический контроль и управление производственными процессами в химической и деревообрабатывающей промышленности", Минск, 1973.

9. Кобринец В.П., Дегтярев Л.Д., Станишевский В.Н. Оптимизация процесса флотации калийных руд с применением метода динамического программирования. Тезисы докладов семинара "Автоматический контроль и управление производственными процессами в химической и деревообрабатывающей промышленности", Минск, 1973.

Основные результаты работы доложены и обсуждены:

на ежегодных научно-технических конференциях Белорусского технологического института им. С.М. Кирова, (Минск, 1968-1972 г.г.);

на II Всесоюзной межвузовской конференции по автоматизации химических производств, (Москва, МИХМ, 1968);

на VI и VII Всесоюзных конференциях по технологии неорганических веществ и минеральных удобрений, (Тбилиси, 1969, и Минск, 1970);

на Всесоюзном научном семинаре по обогащению калийных руд, (Минск, 1969);

на семинаре "Автоматический контроль, регулирование и управление производственными процессами в химической промышленности", (Киев, КДНТЭП, 1972);

на семинаре "Применение ЭВМ в расчетных методах в машиностроении", (Киев, КДНТЭП, 1972);

на семинаре "Автоматический контроль и управление производственными процессами в химической и деревообрабатывающей промышленности", (Минск, БелНИИХИ, 1973).

Л 52084 от 10.1.1974 г. Обем 1,25 п. л. Зак. 104. Тир. 120

Типография МХТИ имени Д. И. Менделеева