

Учреждение образования

**БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ**

УДК 621.865.8:621.791

ВАСИЛЕНКО
Андрей Александрович

**МОДЕЛИРОВАНИЕ, ИДЕНТИФИКАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ
ПРОЦЕССОМ ФЛОТАЦИИ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ КАЛИЙНЫХ
УДОБРЕНИЙ**

05.13.06 – автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (промышленность)

АВТОРЕФЕРАТ
Диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Минск 2004

Работа выполнена в Учреждении образования “Белорусский государственный технологический университет”

Научный руководитель –

кандидат технических наук, доцент Кузьмицкий И.Ф.

(Учреждение образования “Белорусский государственный технологический университет”)

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Шилин Л.Ю.

(Учреждение образования “Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники)

кандидат технических наук Булова А.Д.

(Иностранное предприятие “ЭПАМ Системз”)

Оппонирующая организация –

Белорусский научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт горной и химической промышленности ОАО “Белгорхимпром”

Защита состоится 09 декабря 2004 года в 14 часов на заседании совета по защите диссертаций Д 02.15.01 при учреждении образования “Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники” по адресу: 220013, г. Минск, ул. П.Бровки, 6, БГУИР, корп. 1, ауд. 232, тел. 239-89-89.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

Минеральные удобрения, содержащие хлористый калий, являются одним из важнейших видов удобрений для сельского хозяйства. Неуклонное расширение производства, усложнение технологии, обусловленное потребностями мирового рынка, высокие требования к качеству продукции, обеспечение её экспортной способности, постоянное ухудшение качества добываемой руды, достижения в области микропроцессорной техники, ядерно-физических методов экспрессного контроля состава веществ, математического моделирования и теории автоматического управления приводят к необходимости и возможности создания автоматической системы управления на сильвинитовых обогатительных фабриках (СОФ). Наиболее сложными и во многом определяющими эффективность работы СОФ являются процессы флотации калийной руды, расход и стоимость флотационных реагентов, которые вносят существенный вклад в себестоимость готовой продукции и составляют до 30% от себестоимости процесса обогащения. При этом их дозирование зачастую ведется неоптимально, без учета факторов, влияющих на их расход, по результатам лабораторных исследований с большой задержкой во времени. В связи с этим весьма актуальной является задача исследования и разработки систем адаптивного управления процессом флотационного обогащения калийных фабрик.

Связь работы с крупными научными программами, темами.

Диссертационная работа выполнена на кафедре Автоматизации производственных процессов и электротехники Белорусского государственного технологического университета в рамках тематического плана развития НИОКР РУП «ПО «Беларуськалий».

Цель и задачи исследований.

Целью работы является разработка, исследование и создание средств контроля, методик выполнения измерений и усовершенствование системы автоматизированного управления процессом основной флотации для повышения эффективности флотационного обогащения калийных руд на сильвинитовых обогатительных фабриках.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- 1) исследовать процесс обогащения сильвинита как объекта управления; выявить факторы, влияющие на расходы реагентов, установить связь между расходом реагентов и содержанием массовой доли KCl и нерастворимого

остатка в руде и продуктах обогащения для создания системы автоматического управления процессом флотации;

2) разработать средства и методику автоматического контроля параметров технологического процесса, связанных с ведением реагентного режима, как составную часть системы автоматического управления;

3) на основе анализа состояния проблемы автоматического контроля и управления процессом флотации разработать математическую модель процесса основной флотации, позволяющей установить алгоритмы управления дозированием реагентов;

4) разработать адаптивную экстремальную систему управления процессом основной флотации; провести аналитические и экспериментальные исследования разработанной системы.

Объект и предмет исследования.

Объектом исследования является процесс основной флотации при производстве калийных удобрений. Предметом исследования являются методы контроля параметров процесса и алгоритмы синтеза автоматической системы управления процессом основной флотации.

Методология и методы проведенного исследования.

Общая методология работы предусматривает сочетание теоретических и экспериментальных исследований, которые базировались на основе использования теории управления, математическом аппарате решения интегро-дифференциальных уравнений и на статистическом анализе результатов эксперимента.

Научная новизна и значимость полученных результатов.

На основании выполненных в диссертации исследований и разработок были получены следующие научные результаты:

1) разработан и внедрен многопараметрический метод контроля концентрации массовой доли хлористого калия в азириванной суспензии;

2) впервые разработана математическая модель процесса основной флотации на основе функционального ряда Вольтерра;

3) разработана адаптивная экстремальная система управления процессом основной флотации.

Практическая значимость полученных результатов.

Результаты диссертационной работы внедрены и используются для системы автоматического контроля массовой доли KCl в твердой фазе отвальных шламов на ПО «Беларуськалий» (г. Солигорск), в учебном процессе на кафедре Автоматизации производственных процессов и электротехники БГТУ в дисциплинах «Метрология и технические измерения в отрасли» и «Моделирование объектов и систем управления».

Основные положения диссертации, выносимые на защиту.

На защиту выносятся следующие научные положения:

- система автоматического контроля и методика выполнения измерений массовой доли хлористого калия, твердой, жидкой и газообразной фаз во флотомашине, в исходном сырье и продуктах обогащения;
- математическая модель и методика моделирования процесса основной флотации;
- методология построения системы управления процессом основной флотации.

Личный вклад соискателя. Основные научные и практические результаты диссертационной работы, а также положения, выносимые на защиту, разработаны и получены автором лично. Научный руководитель принимал участие в постановке задачи и определении возможных путей решения.

Апробация результатов диссертации.

Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на Международной научно-практической конференции «Качество-99» (Минск, Беларусь, 1999), Международной научно-технической конференции «Автоматический контроль и автоматизация производственных процессов» (Минск, Беларусь, 2000), Международной научно-технической конференции «Современные технологии, материалы, машины и оборудование» (Могилев, Беларусь, 2002), Международной научно-технической конференции «Наука – образованию, производству, экономике» (Минск, Беларусь, 2003), Международной научно-технической конференции «Автоматический контроль и автоматизация производственных процессов» (Минск, Беларусь, 2003), VI Республиканской научной конференции студентов и аспирантов «Новые математические методы и компьютерные технологии в проектировании, производстве и научных исследованиях» (Гомель, Беларусь, 2003), а также на университетских научно-технических конференциях БГТУ в 1999 – 2003 годах.

Опубликованность результатов.

По результатам диссертационной работы опубликовано 17 печатных работ, включая 4 статьи в научных журналах, 3 статьи в сборниках научных трудов, 4 статьи в материалах международных конференций, 4 тезиса научных конференций, 2 заявки на патент. Общий объем опубликованных работ составляет около 40 печатных страниц.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, 4 глав, заключения, списка использованных источников и 10 приложений.

Полный объем диссертации составляет 160 страниц, включая 34 рисунка и 9 таблиц на 16 страницах, список использованных источников из 144 наименований на 10 страницах, 10 приложений на 47 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность работы, определены цели исследования, основные задачи, научная новизна, дана характеристика работы по главам.

В первой главе произведен анализ проблем автоматизации процесса флотации калийных удобрений. Ввиду того, что наибольший экономический эффект может быть достигнут при оптимизации процесса флотации, а стоимость флотореагентов вносит наиболее весомый вклад в себестоимость готовой продукции, то перспективным направлением является автоматизация процесса флотации. С точки зрения автоматизации, технологический процесс флотации относится к классу сложных нестационарных вероятностных процессов. Характерной особенностью процесса является многокритериальность и необходимость управления при неполной информации о всех факторах, определяющих технико-экономические показатели. Дозирование реагентов ведется оператором в основном по цвету пены в флотационной машине и зависит от субъективных причин (опыта оператора, внимательности и т.д.), зачастую неоптимально и без учета факторов, влияющих на их расход. В связи с этим весьма актуальной является задача исследования и разработки методов автоматического контроля параметров процесса, системы адаптивного экстремального управления процессом флотационного обогащения калийных фабрик. Также необходима разработка алгоритмов коррекции коэффициентов модели при изменениях режимов работы фабрики, а при незначительных изменениях характеристик объекта – параметров регуляторов, поиска и коррекции экстремальной характеристики управляющего сигнала в зависимости от состава руды.

В изученных литературных источниках отсутствуют материалы, касающиеся комплексного измерения параметров аэрированной суспензии, измерения массовой доли калия в добываемой руде, противоречивы сведения о методах получения математической модели процесса флотации, построении автоматической экстремальной адаптивной системы управления.

Во второй главе проводятся исследования параметров аэрированной суспензии и разработка измерительного комплекса массовой доли калия в твердой фазе суспензии. Специфические условия эксплуатации аппаратуры автоматического контроля на калийных фабриках, связанные с высокой агрессивностью рабочих сред, повышенной абразивностью и склонностью к кристаллизации, загрязненность технологических аппаратов и трубопроводов ограничивают выбор методов и средств измерения содержания массовой доли

калия в твердой фазе суспензии. Наиболее подходящим методом для контроля состава суспензий является радиометрический метод. Для контроля массовой доли калия используется естественная радиоактивность сивьинита, так как частицы, содержащиеся в руде и концентрате, содержат изотоп K^{40} , равномерно распределенный по массе. Поскольку KCl присутствует и в твердой и в жидкой фазе, то этот метод позволяет оценить только общее содержание калия в суспензии. Дополнительные сложности при измерениях вызывает аэрация суспензии. На направление движения частиц в суспензии влияет масса факторов: скорость потока жидкости в трубопроводе, добавление реагентов, различные способы ведения технологического режима, поток пузырьков воздуха от импеллеров, различная массы частиц и т.д. Для отражения вероятностного движения частиц используется уравнение Фокера-Планка-Колмогорова.

Косвенно оценить содержание твердой фазы можно по плотности суспензии. Известен метод контроля с использованием радиоизотопного плотномера. Кроме того, содержание твердого зависит от растворимости, т.е. от температуры суспензии.

Установлено соотношение для определения зависимости содержания хлористого калия от параметров среды:

$$C = \frac{M^k}{M} = \frac{M_T^k + M_{ж}^k}{M_T + M_{ж}} = \frac{\frac{M_T^k + M_{ж}^k}{M_T}}{1 + \frac{M_{ж}}{M_T}} = \frac{C_{Т.ф.} + \frac{M_{ж}^k}{M_T}}{1 + \frac{M_{ж}}{M_T}} = \frac{C_{Т.ф.}^k + \frac{M_{ж}^k}{M_T} \times \frac{M_{ж}}{M_T}}{1 + \frac{M_{ж}}{M_T}}$$

где M_T – масса твердой фазы; $M_{ж}$ – масса жидкой фазы; M_T^k – масса калия в твердой фазе; $M_{ж}^k$ – масса калия в жидкой фазе; M^k – общее содержание калия в суспензии; M – общая масса контролируемого объема суспензии.

Соотношение масс жидкой и твердой фаз выражается в виде $\lambda = \frac{M_{ж}}{M_T} = \frac{1-T}{T}$, где $T = \frac{(\rho_c - \rho_{ж}) \cdot \rho_T}{(\rho_T - \rho_{ж}) \cdot \rho_c}$ – массовая доля твердого в контролируемой среде; ρ_c , $\rho_{ж}$, ρ_T – плотность контролируемой среды (суспензии), жидкой и твердой фазы соответственно. Тогда:

$$C_{Т.ф.} = \frac{C(\rho_T - \rho_{ж}) \cdot \rho_c - C_{ж.ф.}(\rho_T - \rho_c) \cdot \rho_{ж}}{(\rho_c - \rho_{ж}) \cdot \rho_T}$$

При постоянной температуре $\rho_m = const$, $\rho_{ж} = const$, $C_{ж.ф.} = const$, и $C_{т.ф.} = C_{т.ф.}(C, \rho_c)$ является функцией двух переменных.

Поскольку температура суспензии непостоянна, то $C_{ж.ф.} = C_{ж.ф.}(t)$ и $\rho_{ж} = \rho_{ж}(t)$ являются функциями температуры, в интервале температур (10+30°C) эти зависимости могут быть выражены линейной функцией:

$$C_{ж.ф.} = a + \beta t; \quad \rho_{ж.с.} = \alpha + \beta$$

Аэрация суспензии приводит к дополнительной погрешности измерения концентрации твердого вещества. Эта погрешность пропорциональна концентрации газообразной фазы и может в несколько раз превышать

основную погрешность измерения. Для контроля состава азрированной суспензии можно использовать такие свойства, как плотность и удельная электропроводность суспензии.

Согласно принятой методике радиометрического контроля плотность шлама можно измерить радиоизотопным плотномером, принцип действия которого основан на зависимости степени ослабления потока гамма лучей от плотности среды.

Если в проводящей электрический ток жидкости взвешена твердая фаза, удельная электропроводность которой отличается от удельной электропроводности жидкости, то концентрация твердой фазы может быть определена кондуктометрическим методом. Зависимость удельной электропроводности суспензий от концентрации твердого удовлетворительно аппроксимируется линейной функцией для флотационного хлористого калия. При наличии азрации измеренная плотность шлама ρ_c^{asp} будет зависеть от объемной концентрации дисперсной фазы X_v (суммы твердой и газообразной фаз):

$$X_v = \frac{V_T + V_a}{V_T + V_x + V_a}$$

Плотность азрированной суспензии:

$$\rho_c^{asp} = \frac{M_c^{asp}}{V} = \frac{M_T + M_x}{V_T + V_x + V_a}$$

С учетом выражения для массовой доли твердого зависимость между плотностями неазрированной суспензии ρ_c и азрированной суспензии ρ_c^{asp} принимает вид:

$$\frac{(\rho_c - \rho_x) \cdot \rho_T}{\rho_T - \rho_x} = \rho_c^{asp} - \rho_x \cdot (1 - X_v) \text{ или } \rho_c = \frac{1}{\rho_T} \cdot [\rho_c^{asp} - \rho_x \cdot (1 - X_v)] \cdot (\rho_T - \rho_x) + \rho_x$$

При заданной температуре $\rho_m = const$, $\rho_x = const$ плотность ρ_c является функцией двух параметров $\rho_c = \rho_c(\rho_c^{asp}, X_v)$, а при измерении температуры – функцией трех параметров $\rho_c = \rho_c(\rho_c^{asp}, X_v, t)$. Контроль объемной концентрации дисперсной среды можно выполнить при помощи кондуктометра. Наличие в суспензии пузырьков воздуха завышает показания кондуктометрического концентратомера, а показания радиоизотопного плотномера занижаются. Эти две погрешности компенсируют друг друга. На основе разности показаний можно также судить о степени азрации суспензии.

Таким образом, для измерения массовой доли калия в твердой фазе суспензии необходимо контролировать четыре параметра:

- общую массовую долю калия в суспензии C ;
- температуру суспензии t ;
- плотность азрированной суспензии ρ_c^{asp} ;
- объемную концентрацию дисперсной фазы X_v .

Предложен многопараметрический метод контроля массовой доли КСl в аэрированной суспензии и разработан измерительный комплекс. Измерительный комплекс состоит из радиоизотопного плотномера, кондуктометрического кондуктометра, сцинтилляционного детектора для измерения концентрации КСl по естественной радиоактивности изотопа калия K^{40} и термометра сопротивлений Pt100. Расчет массовой доли КСl в твердой фазе суспензии предлагается проводить по алгоритму:

$$C_{т.ф} = \frac{C \cdot \left(\frac{A^2}{\rho_{\tau}} \cdot [\rho_c^{asp} - \rho_x \cdot (1 - X_v)] + A \cdot \rho_x \right) - C_{ж.ф} \cdot A \cdot \rho_x \left(1 - \frac{1}{\rho_{\tau}} \cdot [\rho_c^{asp} - \rho_x \cdot (1 - X_v)] \right)}{\rho_c^{asp} - \rho_x \cdot (1 - X_v) \cdot A}$$

где $A = \rho_m - \rho_{ж} \approx \text{const}$ – плотность жидкого – функция температуры; $C = C(N_k)$ – функция скорости счета гамма квантов K^{40} ; $\rho_c^{asp} = \rho_c^{asp}(N_{Cs})$ – функция скорости счёта гамма квантов Cs-137; X – функция проводимости среды; $\rho_{\tau} = \text{const}$; $C_{ж.ф} = C_{ж.ф}(t)$ – функция температуры суспензии.

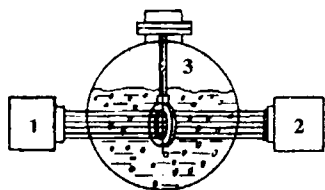


Рис. 1 Способ измерения плотности и концентрации суспензии в совмещенной зоне

Характерной особенностью калийных производств является то, что перерабатываемые суспензии не имеют равномерного распределения твердой фазы по объему. Особенно это заметно в открытых аппаратах и незаполненных трубопроводах. Поэтому измерение плотности суспензии и концентрации дисперсной фазы необходимо проводить в совмещенной зоне по наибольшей чувствительности датчиков плотности 1,2 и объемной концентрации 3 (рис. 1).

Использование многопараметрического метода измерения позволяет уменьшить суммарную погрешность до $\pm 1,5\%$. Проведена оценка метрологических характеристик измерительного комплекса. Разработана программа и методика метрологической аттестации. Разработанный комплекс позволяет сократить время измерений в 15 раз по сравнению с экспрессными лабораторными анализами, повысить точность дозирования реагентов и, соответственно, улучшить управление процессом флотации. Получено решение о выдаче патента на изобретение «Устройство для контроля массовой доли калия в твердой фазе суспензии в процессе флотации».

Разработаны методы измерения концентрация калия и нерастворимого остатка в руде на ленте конвейера, отличающиеся учетом влияния переменной массы материала на ленте, с целью расчета балансных уравнений и корректировки моделей управления реагентами. Для контроля предложен рентгено-флуоресцентный (РФ) метод анализа. Результаты проведенных исследований на стандартных образцах предприятия представлены на рис. 2, 3.

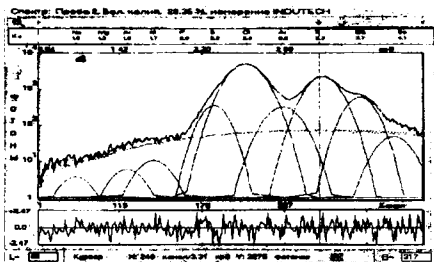


Рис. 2 Спектр рентгеновской флуоресценции пробы КС1

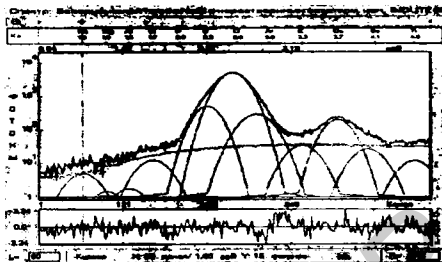


Рис. 3 Спектр рентгеновской флуоресценции NaCl

Таблица 1

Результаты анализа массовой доли КС1 в руде

Диапазон концентраций	Параметр анализа	Величина параметра
20 – 30 %	Коэффициент корреляции	0,998
	Среднее квадратичное отклонение	0,46 %
	Время измерения	5 мин.
7 – 60 %	Коэффициент корреляции	0,998
	Среднее квадратичное отклонение	0,50 %
	Время измерения	5 мин.

Таблица 2

Результаты анализа массовой доли нерастворимого остатка руде

Диапазон концентраций	Параметр анализа	Величина параметра
0,2 – 1,5%	Коэффициент корреляции	0,980
	Среднее квадратичное отклонение	0,1 %
	Время измерения	5 мин.

На основе экспериментальных исследований показано, что погрешность измерения практически не отличается на различных диапазонах, и что времени счета импульсов 5 минут достаточно для получения хороших результатов. В процессе работы, для проверки точности измерения и корректировки калибровки, рекомендуется проводить замер контрольного образца.

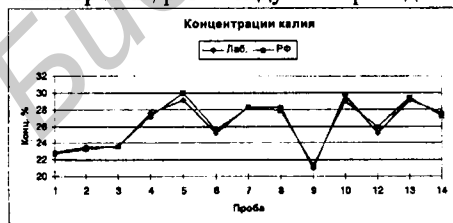


Рис. 4 График корреляции между лабораторными данными и данными РФА для калия

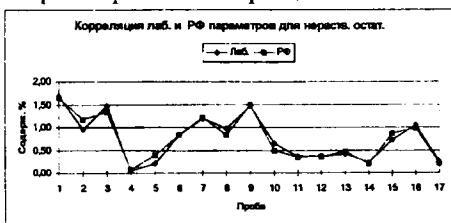


Рис. 5 График корреляции между лабораторными данными и данными РФА для нерастворимого остатка

Для повышения точности измерения РФ анализатора X-Met 920, отвечающего приведенным требованиям, предложена математическая обработка перекрывающихся спектров методом стохастической аппроксимации.

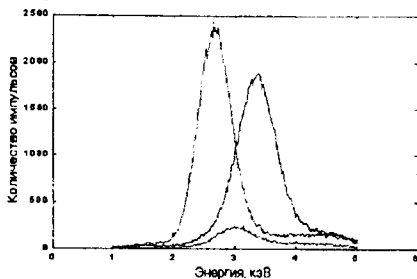


Рис. 6 Распределение хлора, калия, фона

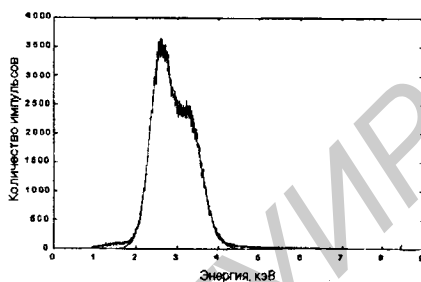


Рис. 7 Распределение KCl 93,58%

Вычисление результатов измерения предложено производить по уравнению вида:

$$P(E) = q_{a,3} \cdot e^{-\frac{|E-q_{a,1}|^{q_{a,4}}}{q_{a,2}}} + q_{k,3} \cdot e^{-\frac{|E-q_{k,1}|^{q_{k,4}}}{q_{k,2}}}$$

Получены следующие коэффициенты уравнения:

для спектра хлора: $q_{a,1}=1,894$; $q_{a,2}=0,156$; $q_{a,3}=0,003$; $q_{a,4}=2,577$;

для спектра калия: $q_{k,1}=1,822$; $q_{k,2}=0,241$; $q_{k,3}=0,002$; $q_{k,4}=3,280$.

Проведена оценка метрологических характеристик. Абсолютная суммарная погрешность измерения массовой доли калия в продуктах обогащения не превышает $\pm 0,5\%$ K_2O .

В третьей главе приведено обоснование выбора методики построения и представлены результаты исследований моделей процесса основной флотации.

Анализ методов описания процесса как объекта управления показывает сложность построения и невозможность получения коэффициентов модели аналитическими методами. В связи с этим можно выделить методы идентификации на основе экспериментально-аналитических подходов. Поскольку многие методы идентификации приводят к некорректным задачам, предлагается использовать метод регуляризации.

На основе уравнений кинетики разработана модель процесса основной флотации для узкого диапазона изменения параметров. При небольших вариациях параметров, например, расхода руды в диапазоне от 165 до 178 т/ч, можно лианеризовать объект и использовать модель первого порядка. При построении модели использован метод регуляризации по А.Н. Тихонову. Найден коэффициент регуляризации, который рассчитывается по формуле:

$$\alpha = \frac{\delta}{\left\{ \int_0^{\infty} \varepsilon^2(t) dt \right\}^{\frac{1}{2}} - \delta}$$

где $\varepsilon(t)$ – извлечение в камерный продукт; δ – погрешность оценки $\varepsilon(t)$.

По экспериментальным данным рассчитаны функции распределения частиц вещества по флотиремости $\gamma(K)$ при $\alpha=0,017$ (рис. 9).

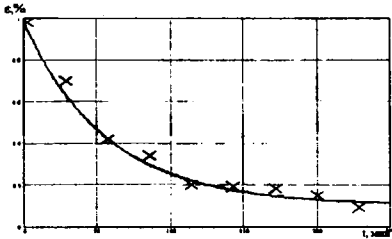


Рис. 8 Результаты эксперимента по кинетике флотации исходного питания (x - эксперимент, — - модель)

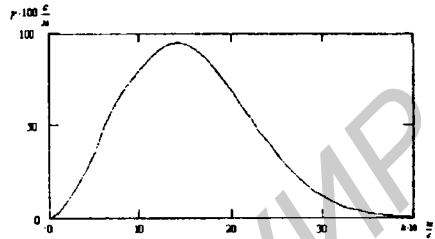


Рис. 9 Результаты расчета $\gamma(K)$ по $\varepsilon(t)$

При изменении параметров объекта, например, при колебании расхода амина в диапазоне от 1,06 до 1,23 м³/ч, данная модель обладает достаточной точностью для практического применения. Для модели первого порядка погрешность не превышает 10%. Эффективность данной модели ограничена рядом условий связанных с ведением реагентного режима. При широком диапазоне изменения входных переменных и возмущающих воздействий, а также на длительном интервале времени погрешность модели увеличивается.

Для расширения диапазона использования модели предложены модели более высокого порядка. Разработана новая динамическая модель процесса основной флотации на основе интегральных рядов Вольтерра, которая учитывает нелинейные свойства объекта. Для построения модели использованы экспериментальные данные на основе пассивного эксперимента (рис. 10).

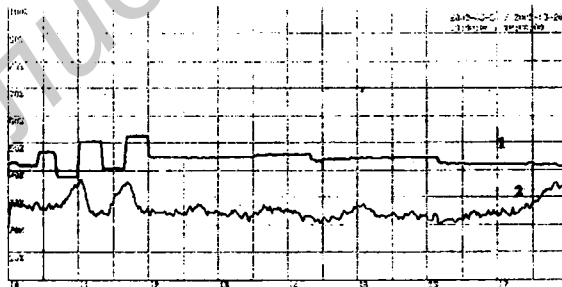


Рис. 10 Экспериментальные данные: расход амина (1) и содержание КС1 в хвостах (2)

Используя полученные ранее зависимости для коэффициента регуляризации, и задаваясь вторым порядком ряда Вольтерра, получены математические модели процесса основной флотации для различных диапазонов изменения параметров:

Для интервала 6 часов:

$$y(t) = 0,416 + \int_0^t 0,500 e^{-1,27(t-\tau)} u_1(\tau) d\tau + \int_0^t \int_0^{\tau} 0,018 e^{-0,13(t-\tau)} u_1(\tau) u_2(\tau) d\tau d\tau$$

Для интервала 12 часов:

$$y(t) = 0,035 + \int_0^t 0,841 e^{-0,32(t-\tau)} u_1(\tau) d\tau + \int_0^t \int_0^{\tau} 1,304 e^{-0,26(t-\tau)} u_1(\tau) u_2(\tau) d\tau d\tau$$

Для интервала 24 часа:

$$y(t) = 1,942 + \int_0^t 10,791 e^{-5,93(t-\tau)} u_1(\tau) d\tau + \int_0^t \int_0^{\tau} 0,550 e^{-0,61(t-\tau)} u_1(\tau) u_2(\tau) d\tau d\tau$$

где $u(\tau)$ – управление; $y(\tau)$ – выходной сигнал.

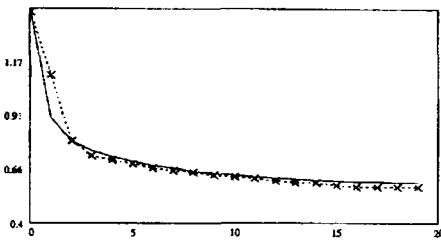


Рис. 11 Результаты проверки
(× – эксперимент, — – модель)

Ядро нулевого порядка является постоянной, ядро первого порядка – реакцией системы на импульсное воздействие, ядра более высокого порядка учитывают нелинейные динамические свойства.

Проверка модели проведена с помощью активного эксперимента (рис. 11). Погрешность модели не превышает 1%.

В четвертой главе рассматриваются методы синтеза и приведены результаты анализа характеристик адаптивной экстремальной системы управления основной стадией процесса флотации. Предложен смешанный критерий управления, учитывающий экономические (себестоимость концентрата при определенных ограничениях его качества) и технологические (извлечение КС1 в концентрат) требования

$$v = f(\Pi_i) \rightarrow \min;$$

$$A = A_{\text{план}}; \beta = \beta_{\text{зад}}$$

где v – содержание КС1 в хвостах; A – производительность; β – содержание КС1 в концентрате.

В ходе теоретических и экспериментальных исследований установлено, что большинство зависимостей процесса имеют экстремальный характер, например, найдена экстремальная зависимость расход амина – извлечение.

Таблица 3

Экспериментальные данные зависимости расход амина – извлечение

Расход амина u , м ³ /ч	0,5	0,9	1,1	1,3	1,5	1,7	1,9	2,3
Извлечение ϵ , %	88,9	91,8	92,5	93,1	92,9	92,7	92,3	92,0

Экстремальный характер имеет зависимость содержания КСI в хвостах и концентрате от весового соотношения жидкое/твердое (т.е. плотности) питания флотации:

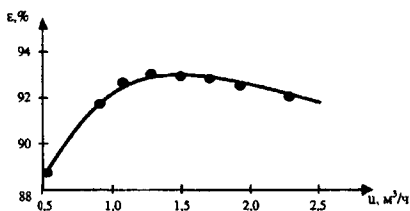


Рис. 11 Зависимость расхода амина – извлечение

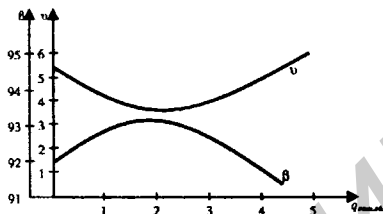


Рис. 12 Зависимость содержания КСI в хвостах γ и концентрате β от плотности питания флотации

Так как процесс флотации является нестационарным и нелинейным, и характеризуется существенным влиянием неконтролируемых возмущений, то в производственных условиях параметры модели изменяются во времени вследствие наличия низкочастотных неконтролируемых возмущений (износ оборудования, выкристаллизация солевых частиц из раствора и т.д.). Необходима периодическая корректировка коэффициентов уравнений модели с целью достижения их соответствия реальным значениям в каждый момент времени. С учетом вышеназванных особенностей предложена структурная схема экстремальной адаптивной системы управления процессом основной флотации (рис. 13).

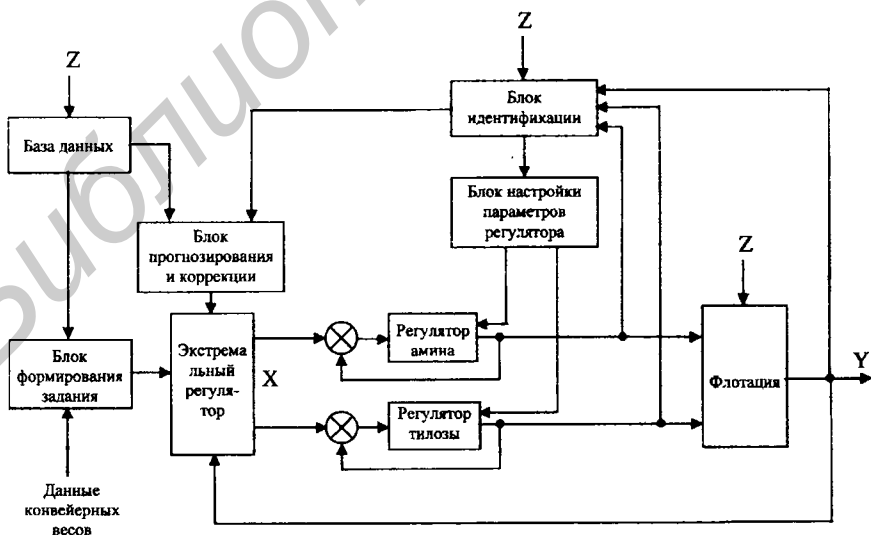


Рис. 13 Структурная схема системы управления процессом флотации

В базе данных хранятся параметры, рассчитанные в процессе проектирования системы для различных режимов работы, информация о методах и условиях поиска экстремума, данные об оптимальных режимах работы объекта с учетом управляющих воздействий. Информация из базы данных поступает в блок формирования задания, где решаются следующие задачи:

- формирование эталонной траектории, реализующей желаемые динамические и статические характеристики адаптивной системы;
- формирование желаемой параметрической модели;
- управление по неполным данным на основе использования стационарных наблюдателей состояния;
- формирование управляющего воздействия для экстремального регулятора.

В блоке экстремального регулятора на основе управляющих и поисковых алгоритмов производится расчет коэффициентов контура управления «расход амина – концентрация КС1 в хвостах», «расход тилозы – концентрация КС1 в хвостах» и синтез управляющего воздействия на регуляторы амина и тилозы.

Данные о процессе поступают в блок идентификации, где в реальном масштабе времени производится расчет параметров модели объекта и пересчет этих параметров с учетом воздействия неконтролируемых возмущений. Для работы в производственных условиях алгоритм коррекции математической модели предусматривает следующие функции:

- 1) процесс уточнения модели ведется с постоянным шагом, который установлен по экспериментальным наблюдениям и равен 20 минут;
- 2) модель корректируется по усредненным за 5-10 шагов данным, так как поправка коэффициентов в этом случае идет с меньшей колебательностью, а число необходимых коррекций сокращается без уменьшения скорости коррекции.

С помощью блока идентификации последовательно во времени определяют неизвестные параметры модели объекта, которые используются для формирования управляющих воздействий исходя из предположения, что найденные оценки параметров совпадают с их истинными значениями. Алгоритм управления включает следующие этапы:

- сбор и обработка информации об объекте;
- корректировка параметров модели с учетом вновь поступивших данных о процессе;
- определение экстремальных значений координат по скорректированной модели;
- реализация управляющих воздействий на объекте.

Параметры уточненной модели поступают в блок прогнозирования и коррекции. При отклонении параметров процесса от расчетных более чем на 10% подается сигнал для коррекции задания. В блоке коррекции производится

подстройка коэффициентов экстремального регулятора в зависимости от рассогласования эталонной модели и расчетной. Корректировка задания экстремального регулятора происходит после окончания процесса оценивания характеристик объекта, что позволяет обеспечить контроль достоверности и точности результатов идентификации объекта.

При незначительных вариациях характеристик объекта управления (до 10% от расчетных), которые оцениваются в режиме эксплуатации, информация с идентификатора передается на блок настройки параметров регулятора для динамической подстройки коэффициентов регулятора амина и тилозы по оценкам характеристик объекта управления, получаемым в режиме нормального функционирования.

В процессе обогащения содержание КС1 в исходной руде непостоянно, что вызывает дрейф экстремальной характеристики. Для устранения погрешностей, вносимых дрейфом, производится измерение качества руды подаваемой во флотомашину, и в блок формирования задания вводится корректирующий сигнал. Также сравнивается величина выхода объекта на различных поисковых шагах, для определения характеристики дрейфа с целью его последующего исключения.

Алгоритмы управления реализованы на программируемом контроллере Simatic S7 (Siemens).

С учетом приведенной структуры системы управления, полученной модели и использованием функции Ляпунова показано, что решение обладает устойчивостью при постоянно действующих возмущениях.

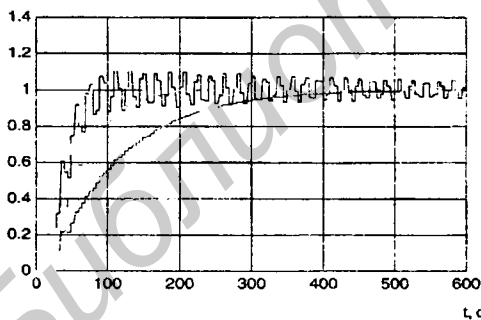


Рис. 1.4 Переходные характеристики системы управления

Проведено моделирование системы управления при изменяющихся параметрах объекта и получены переходные характеристики, которые показали устойчивость системы (рис. 14). Используя полученную зависимость «расход амина – извлечение», исследованы алгоритмы поиска экстремума, в частности по чувствительности функции, которые показали, что время выхода на экстремум составляет 60 минут (рис. 15).

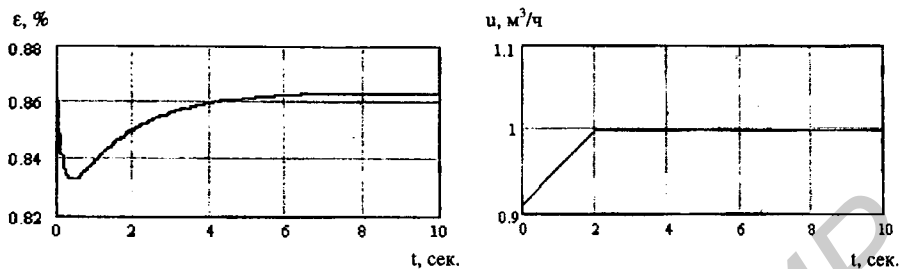


Рис. 15 Фрагмент переходного процесса с использование экстремального регулятора

Приложения содержат структурные схемы; экспериментальные данные для метрологической оценки; экспериментальные данные для построения модели; листинг программы поиска коэффициентов модели; графики переходных процессов; акты внедрения результатов диссертационной работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты диссертационной работы следующие:

1. Исследование процесса флотации калийной руды показало наличие большого числа входных и возмущающих воздействий с широким диапазоном изменения параметров. Агрессивность и специфические особенности продуктов обогащения усложняют процесс автоматического контроля и управления процессом флотации. Существующие автоматические системы измерения качественных показателей не обеспечивают необходимой точности. Необходим комплексный и системный подход для разработки автоматической системы контроля и управления параметрами процесса. Из-за нестационарности объекта математические модели, описывающие процесс, быстро становятся неадекватными. Существующая автоматизированная система управления не обеспечивает наилучшего режима ведения технологического процесса, что требует разработки новой системы управления с обеспечением экстремальных зависимостей технологического процесса, адаптацией параметров модели и учетом динамических свойств объекта [5, 7, 8, 11, 12].

2. Разработан новый многопараметрический метод контроля массовой доли KCl в твердой фазе суспензии. В отличие от известных, этот метод позволяет измерять плотность азрированной суспензии, что обусловлено дополнительным контролем дисперсной фазы суспензии, а также температурой суспензии. Проведены исследования эффективности предложенного метода и разработана программа и методика метрологической аттестации. Данный метод позволяет уменьшить погрешность измерения массовой доли KCl до $\pm 1,5\%$, что

приближает точность измерений к лабораторным методам. На основе полученных теоретических и практических результатов разработан информационно-измерительный комплекс с целью коррекции модели при управлении дозированием реагентов. Разработаны алгоритмы и исследована система измерения полезного компонента в черновом и готовом концентратах, а также на ленте конвейера с использованием метода рентгеновской флуоресценции для определения управляющих воздействий на дозирование реагентов [1, 2, 4, 5, 7, 16].

3. Разработана математическая модель процесса флотации на основе функционального ряда Вольтерра. В отличие от известных, эта модель позволяет учитывать нелинейные свойства процесса и более компактно описывать динамическую систему. Для получения устойчивого решения предложено использовать метод регуляризации. Получены математические модели процесса основной флотации для различных диапазонов изменения параметров процесса [6, 10, 14].

4. Разработана адаптивная экстремальная система управления процессом основной флотации. В отличие от известных, при формировании управляющего воздействия в данной системе учтены экстремальные зависимости извлечения от расхода реагентов. В связи с дрейфом коэффициентов математической модели, обусловленным нестационарностью процесса и износом оборудования, предложен алгоритм подстройки и коррекции параметров модели методом стохастической аппроксимации. Динамическая коррекция параметров регулятора, позволяет адаптировать систему управления при кратковременных возмущениях. Исследована работа системы управления при различных режимах работы, которая показала устойчивость алгоритма управления, определены переходные характеристики [3, 6, 9, 13].

Эффективность полученных результатов подтверждена практическим применением при решении производственных задач. Разработанные в диссертационной работе методы, алгоритмы и система управления внедрены на ПО «Беларуськалий» для автоматизации процесса основной флотации и управления дозированием реагентов, а также используются в учебном процессе на кафедре автоматизации технологических процессов и электротехники БГТУ в дисциплинах «Метрология и технические измерения в отрасли» и «Моделирование объектов и систем управления».

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в научных журналах

1. Василенко А.А. Особенности непрерывного измерения нерастворимого остатка методом рентгеновской флуоресценции в условиях ПО «Беларуськалий» // Промышленные АСУ и контроллеры. - 2002. - №9. - С.55-56.
2. Кузьмицкий И.Ф., Овсянников А.В., Василенко А.А. Предварительная обработка спектров при измерении процентного содержания КСl на основе рентгенофлуоресцентного комплекса // Аналитика и контроль. - 2002. - Т.6. №5. - С.550-552.
3. Василенко А.А., Кузьмицкий И.Ф. Синтез экстремальной системы управления процессом основной флотации с адаптивным блоком идентификации параметров // Промышленные АСУ и контроллеры. - 2003. - №6. - С.40-41.
4. Кузьмицкий И.Ф., Василенко А.А., Ритгер А. Применение метода РФА для непрерывного измерения концентрации калия при производстве калийных удобрений // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. - 2003. -Т.69. №6. - С.20-22.

Статьи в сборниках научных трудов

5. Василенко А.А. Исследование комбинированной системы измерения массовой доли калия в твердой фазе суспензии в процессе флотации // Серия VI Физико-математические науки и информатика: Труды БГТУ. Выпуск X. - Минск, 2002. - С.146-151.
6. Василенко А.А. Исследование экстремальной адаптивной системы управления процессом флотации // Серия VI Физико-математические науки и информатика: Труды БГТУ. Выпуск XI. - Минск, 2003. - С.154-157.
7. Василенко А.А. Синтез и исследование экстремальной системы управления процессом флотации // Серия VI Физико-математические науки и информатика: Труды БГТУ. Выпуск XII. - Минск, 2004. - С.113-117.

Статьи в сборниках научно-технических конференций

8. Василенко А.А. Исследование методики выполнения измерений массовой доли КСl в процессах обогащения калийных руд // Автоматический контроль и автоматизация производственных процессов: Материалы Международной научно-технической конференции 25-26 октября 2000 г. - Минск, 2000. - С.31-32.
9. Василенко А.А., Василенко А.А. Автоматический контроль состава веществ в продуктах обогащения калийных производств // Автоматический контроль и автоматизация производственных процессов. Материалы Международной

научно-технической конференции 25-26 октября 2000 г. – Минск, 2000. – С.38-39.

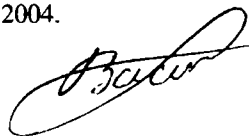
10. Василенко А.А. Автоматическая система управления процессом флотации при производстве калийных удобрений // Автоматический контроль и автоматизация производственных процессов: Материалы Международной научно-технической конференции 22-24 октября 2003 г. – Минск, 2003. – С.123-126.
11. Василенко А.А., Попадько А.Е. Метод идентификации нелинейных динамических объектов с изменяющимися параметрами // Автоматический контроль и автоматизация производственных процессов: Материалы Международной научно-технической конференции 22-24 октября 2003 г. – Минск, 2003. – С.173-175.

Тезисы докладов научно-технических конференций

12. Василенко А.А., Василенко А.А. Ядерно-физические методы контроля качества калийных удобрений // Качество-99: Тезисы докладов Международной научно-практической конференции «Качество-99» 10-12 ноября 1999 г. – Минск, 1999. – С.216-217.
13. Кузьмицкий И.Ф., Василенко А.А. Контроль качества руды на ленте конвейера // Современные технологии, материалы, машины и оборудование: Тезисы докладов Международной научно-технической конференции. – Могилев, 2002. – С. 73.
14. Василенко А.А. Разработка системы адаптивного управления процессом флотации // Наука – образованию, производству, экономике: Рефераты докладов Международной научно-технической конференции 4-7 февраля 2003. Т.1. – Минск, 2003. – С.112.
15. Василенко А.А. Система оптимального управления процессом флотации с адаптивным блоком идентификации параметров // Новые математические методы и компьютерные технологии в проектировании, производстве и научных исследованиях: Материалы VI Республиканской научной конференции студентов и аспирантов 17-19 марта 2003 года. – Гомель, 2003. – С. 95.

Патенты и заявки на изобретения

16. Заявка на патент Республики Беларусь. Устройство для контроля массовой доли калия в твердой фазе суспензии в процессе флотации / Кузьмицкий И.Ф., Василенко А.А. – №а20020179, заявл. 06.09.2004.
Решение о выдаче патента на изобретение №а20020179 от 10.18.2004.
17. Заявка на патент Республики Беларусь. Способ измерения массовой доли калия в твердой фазе суспензии в процессе флотации / Кузьмицкий И.Ф., Василенко А.А. – №а20020009, заявл. 06.09.2004.



дысертацыі Васіленка Андрэя Аляксандравіча

“Мадэляванне, ідэнтыфікацыя і кіраванне працэсам флатацыі ў калійнай вытворчасці”

Ключавыя словы: флатацыя, вымярэнне вагавай часткі, ідэнтыфікацыя, матэматычная мадэль, адаптыўная экстрэмальная сістэма кіравання.

Мэтай працы з’яўляецца распрацоўка, даследванне і стварэнне сродкаў кантролю, мэтодык выканання вымярэнняў і удасканаленне сістэмы аўтаматызаванага кіравання працэсам асноўнай флатацыі для павышэння эфектыўнасці флатацыйнага узбагачэння калійных руд на сільвінітавых узбагачальных фабрыках.

Аб’ектам даследавання з’яўляецца працэс асноўнай флатацыі пры вытворчасці калійных угнаенняў. Прадметам даследавання з’яўляюцца метады кантролю параметраў працэса і алгарытмы сінтэзу аўтаматычнай сістэмы кіравання працэсам асноўнай флатацыі.

Распрацаваны новы шматпараметрычны метады кантролю вагавай часткі КСІ у цвёрдай фазе суспензіі. У адрозненні ад вядомых, гэты метады дазваляе вымяраць шчыльнасць аэрыраванай суспензіі, калі дадаткова кантралюецца дысперсная фаза суспензіі, а таксама тэмпература суспензіі. Распрацавана праграма і метадыка метралагічнай атэстацыі. Распрацаваны алгарытмы і даследавана сістэма вымярэння карыснага кампанента ў чарнавым і гатовым канцэнтраце, а таксама на стужцы канвеера з выкарыстаннем метада рэнтгенаўскай флуарэсценцыі для вызначэння кіруючых уздзеянняў пры дазаванні рэагентаў. Распрацавана матэматычная мадэль працэса флатацыі з выкарыстаннем функцыянальнага шэрага Вальтэра. У адрозненні ад вядомых, гэта мадэль дазваляе ўлічваць нелінейныя уласцівасці працэса і больш кампактна апісваць дынамічныя якасці сістэмы. Для атрымання ўстойлівага рашэння задачы ідэнтыфікацыі прапанавана выкарыстоўваць метады рэгулярызацыі. Атрыманы матэматычныя мадэлі працэса асноўнай флатацыі для розных дыяпазонаў змянення параметраў працэса. Распрацавана адаптыўная экстрэмальная сістэма кіравання працэсам асноўнай флатацыі. У адрозненні ад вядомых, пры фармаванні кіруючага ўздзеяння ў дадзенай сістэме ўлічаны экстрэмальныя залежнасці здабывання КСІ ад расходу рэагентаў. Прадугледжана дынамічная каррэкцыя параметраў мадэлі і рэгулятарна. Паказана устойліваць сістэмы кіравання. Эфектыўнаць атрыманых вынікаў пацверджана практычным выкарыстаннем пры рашэнні вытворчых задач.

диссертации Василенко Андрей Александровича

“Моделирование, идентификация и управление процессом флотации при производстве калийных удобрений”

Ключевые слова: флотация, измерения массовой доли KCl, идентификация, математическая модель, адаптивная экстремальная система управления.

Целью работы является разработка, исследование и создание средств контроля, методик выполнения измерений и усовершенствование системы автоматизированного управления процессом основной флотации для повышения эффективности флотационного обогащения калийных руд на силивинитовых обогатительных фабриках.

Объектом исследования является процесс основной флотации при производстве калийных удобрений. Предметом исследования являются методы контроля параметров процесса и алгоритмы синтеза автоматической системы управления процессом основной флотации.

Разработан новый многопараметрический метод контроля массовой доли калия, который в отличие от известных методов, позволяет измерять содержание KCl в твердой фазе аэрированной суспензии, что обусловлено дополнительным контролем дисперсной фазы суспензии, а также температурой суспензии. Разработана программа и методика метрологической аттестации. Разработаны алгоритмы и исследована система измерения полезного компонента в черновом и готовом концентратах, а также на ленте конвейера с использованием метода рентгеновской флуоресценции для определения управляющих воздействий при дозировании реагентов. Разработана математическая модель процесса флотации на основе функционального ряда Вольтерра. В отличие от известных, данная модель позволяет учитывать нелинейные свойства процесса и более компактно описывать динамические свойства системы. Для получения устойчивого решения предложено использовать метод регуляризации. Получены математические модели процесса основной флотации для различных диапазонов изменения параметров процесса. Разработана адаптивная экстремальная система управления процессом основной флотации. В отличие от известных, при формировании управляющего воздействия в данной системе учтены экстремальные зависимости извлечения от расхода реагентов. Предусмотрена динамическая коррекция параметров модели и регулятора. Показана устойчивость системы управления. Эффективность полученных результатов подтверждена практическим применением при решении производственных задач.

SUMMARY

VASILENKO Andrei Aleksandrovich

“Modelling, identification and management of process of flotation by manufacture of potash fertilizers”

Key words: flotation, measurements of mass fraction KCl, identification, mathematical model, an adaptive extreme control system.

The purpose of work is development, research and creation of means of the control, techniques of performance of measurements and improvement of system of automated management by process of the basic flotation for increase of efficiency flotation enrichments of potash ores on silvinit concentrating factories.

Object of research is process of the basic flotation by manufacture of potash fertilizers. An object of research are a quality monitoring of parameters of process and synthesis algorithms of an automatic control system of process of the basic flotation.

The new multiparameter quality monitoring of a mass fraction KCl which as against known methods, allows to measure contents KCl in a firm phase of aerated suspension is developed, that is caused by the additional control of a disperse phase of suspension, and also temperature of suspension. The program and a technique of metrological certification is developed. Algorithms are developed and the system of measurement of a useful component in draft and ready concentrates, and also on a tape of the conveyor with use of a method of x-ray fluorescence for definition of managing influences is investigated at batching reagents. The mathematical model of process of flotation is developed on the basis of functional lines Volterra. As against known, the given model allows to take into account nonlinear properties of process and more compactly to describe dynamic properties of system. For reception of the steady decision it is offered to use a method of regularization. Mathematical models of process of the basic flotation for various ranges of change of parameters of process are received. The adaptive extreme control system of process of the basic flotation is developed. As against known, at formation of managing influence in the given system extreme dependences of extraction on the charge of reagents are taken into account. Dynamic correction of parameters of model and a regulator is stipulated. Stability of a control system is shown. Efficiency of the received results is confirmed with practical application at the decision of industrial tasks.

Василенко Андрей Александрович

**МОДЕЛИРОВАНИЕ, ИДЕНТИФИКАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ
ПРОЦЕССОМ ФЛОТАЦИИ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ КАЛИЙНЫХ
УДОБРЕНИЙ**

**05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и
производствами (промышленность)**

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Подписано в печать	01.11.2004.	Формат 60x84 1/16.	Бумага офсетная.
Гарнитура «Таймс».	Печать ризографическая.		Усл. печ. л. 1,63.
Уч.-изд. л. 1,4.	Тираж 80 экз.		Заказ 650.

Издатель и полиграфическое исполнение: Учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»
Лицензия на осуществление издательской деятельности №02330/0056964 от 01.04.2004.
Лицензия на осуществление полиграфической деятельности №02330/0133108 от 30.04.2004.
220013, Минск, П. Бровки, 6.