РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ

ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ РАЗРАБОТКИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

2019

УДК 622.7.01

КОНТРОЛЬ РАСХОДА РЕАГЕНТА-СОБИРАТЕЛЯ В ПРОЦЕССЕ ФЛОТАЦИИ СУРЬМЫ ПО ВИДЕОИЗОБРАЖЕНИЮ ПЕННОГО СЛОЯ

Бинь-фан Цао^{1,2}, Юн-фан Се¹, Чунь-хуа Ян¹, Вей-хуа Гуй¹, Цзянь-ци Ли²

¹Центральный южный университет, Чанша, 410083, Китай ²Колледж физики и электроники, Хунаньский университет, Хунань 415000, Китай

Предложена стратегия комбинированного контроля за расходом реагента при флотационном обогащении сурьмяных руд. Она состоит из двух частей: контроль реагента, основанный на отслеживании пенообразования при помощи функции распределения случайных величин, и контроль добавочного внесения реагента с использованием варианта модели прогнозирования при помощи распределительной системы машинного зрения. Методика протестирована в ходе флотационного обогащения золото-сурьмяных руд, в результате чего повышается выход флотационных хвостов, а стандартное отклонение ценных компонентов в хвостовых отходах уменьшается. Метод эффективно воздействует на факторы нарушения стабильности работы флотационного процесса и повышает производительность флотационного передела.

Пенная флотация, контроль расхода реагента, размер пузырьков, функция распределения случайных величин, управление средствами нечеткой логики

DOI: 10.15372/FTPRPI20190315

Пенная флотация — один из важнейших методов обогащения минеральных веществ, который широко применяется в металлургии, угольной и химической промышленности и в других производственных направлениях. В Китае более 90% цветных металлов перерабатываются методом пенной флотации. Сложный механизм флотации и изменчивость исходных факторов при подаче материала, а также длительность процесса осложняют его эффективное проведение при использовании традиционных методов контроля параметров работы (дозирование, уровень пульпы и барботирования) [1, 2]. Традиционная подача реагентов основана на весовом соотношении собирателя к тонне исходной руды [3]. Вследствие колебаний параметров подаваемого материала (плотность пульпы, размер частиц пульпы, качество загружаемого материала и т. д.) возникают проблемы при использовании общепринятого метода.

Операторы обогатительных фабрик рассматривают пену в качестве индикатора для контроля и оптимизации процесса флотации. Зависимость от опыта оператора может привести к ряду отрицательных последствий, таких как изменение условий работы, переполнение камер

№ 3

Работа выполнена при поддержке Национального проекта по финансированию инновационных исследований (№ 61321003) в рамках ключевого проекта Национального фонда содействия развитию науки в Китае по предоставлению гранта № 61134006, Национального фонда содействия развитию науки в Китае (№ 61473318, 61403136), при содействии Хунаньского образовательного комитета (№ 16С0940).

или оседание твердого, что в итоге увеличивает расход реагента и снижает экономическую выгоду. Основные рабочие параметры включают расход реагента и газа, уровень пульпы [4, 5]. На промышленных предприятиях контроль подачи реагента — важнейший аспект при разработке реагентного режима флотационного обогащения [6].

Одна из главных визуальных характеристик пены — размер пузырьков — может использоваться для определения оптимального расхода реагента [7–9], а также служить индикатором корректности протекания процесса флотации [10, 11]. В [9] объединили систему сбора данных при помощи нескольких изображений с экспертной системой управления и решили, что размер пузырьков может быть контролем расхода сульфата меди. Исходя из размера пузырьков, проанализирована схема дозирования в процессе флотации цинка и проведены сравнительные эксперименты с различными реагентами и усредненным размером пузырьков на этапе основной флотации. Показано, что для размера пузырьков характерно случайное распределение во время флотации и функция случайных величин имеет негауссово распределение [12, 13]. Однако одной лишь характеристики размера пузырьков для описания структуры пены явно недостаточно.

Оценка функций распределения случайных величин обычно разделяется на параметрическую и непараметрическую [14, 15]. Непараметрический метод оценки подходит для неизвестного продолжительного процесса пенной флотации [12]. Оценка при помощи ядерной функции использует данные для актуализации функции распределения случайных величин и не требует теоретических знаний, связанных с распределением выборки. По сравнению с другими непараметрическими методами ядерная оценка применяется чаще.

В настоящей работе представлен улучшенный метод ядерной оценки для определения размера пузырьков посредством функции распределения случайных величин (ФРСВ). Усовершенствованный метод предполагает выбор различной ширины ядерной функции для разных интервалов распределения. После нахождения функции распределения случайных величин для размера пузырьков, отклонение выходной ФРСВ пенообразования от заданной ФРСВ оптимального пенообразования становится показателем к действию. Когда показатель к действию имеет наименьшее значение, соответствующий расход реагента устанавливается в качестве входного. Проблема контроля расхода реагента превращается в проблему его оптимизации.

В представленном обзоре метода регулирования расхода реагента размер пузырьков принят за контролируемый объект, а расход реагента — за регулируемый параметр. Для контроля расхода реагента свойства руды могут выступать в виде предварительных условий. Другие параметры исходного питания (концентрация пульпы, размер частиц, скорость подачи материала и т. д.) рассматриваются как дестабилизирующие факторы. Функция распределения случайных величин оптимального пенообразования получена во время проведения тестов в процессе переработки и учитывает знания специалистов, работавших в идентичных условиях с рудой подобного качества. Однако сложность состава минеральных ресурсов (низкое качество руды, разнообразные примеси) приводит к изменениям параметров подачи материала, которые влияют на качество концентрата и хвостов в процессе обогащения. Поэтому был разработан компенсационный метод регулирования расхода реагента, основанный на модели прогнозирования качества минерального вещества, с целью ослабления влияния дестабилизирующих факторов.

В данном исследовании для процесса флотационного обогащения предложена стратегия комбинированного контроля расхода реагента. Стратегия контроля включает регулирование расхода реагента, основанное на отслеживании ФРСВ размера пузырьков и компенсационном регулировании, использующем модель прогнозирования посредством распределительной системы машинного зрения. Сначала применяется статистическое распределение вероятностей для размера пузырьков, благодаря которому устанавливается расход реагента. Затем, учитывая

параметры подачи материала, разрабатывается компенсационный метод регулирования расхода реагента при помощи прогнозирующей модели для расчета параметров посредством распределительной системы машинного зрения [16].

АНАЛИЗ ФЛОТАЦИОННОГО ПРОЦЕССА

Флотационное обогащение сурьмы. Пенная флотация — метод извлечения ценных минералов из руды, в котором используются различия физико-химических свойств поверхности минералов [2]. Данная работа касается флотационного обогащения золото-сурьмяных руд в Китае. Применяется технология обогащения с выделением ценного минерала в пенный продукт и хвостов, не представляющих ценность. Необогащенная руда, поступающая на переработку, состоит преимущественно из стибнита, арсенопирита и пирита. На обогатительной фабрике внедрена технология флотации, при которой извлечение золота происходит в слабощелочной среде рН 9.8, а выделение сурьмы протекает в слабокислой среде рН 6.5. Процесс флотационного обогащения золото-сурьмяной руды разделен на несколько блоков — основная флотация золота, перечистка золота, основная флотация сурьмы, I перечистка сурьмы, II перечистка сурьмы (рис. 1).



Рис. 1. Схема флотационного обогащения золото-сурьмяной руды: *I* — контактный чан; *2* — основная флотация золота; *3* — основная флотация сурьмы; *4* (I) — I контрольная флотация сурьмы; *4* (II) — II контрольная флотация сурьмы; *5* (I) — I перечистка золота; *5* (II) — II перечистка золота; *6* — флотация промпродукта сурьмы

Верхний слой пены поступает из блока 5 (II) перечистки золота и блока 6 (II) флотации промпродукта сурьмы, образуя разнородные концентраты, при этом нижний шламовый продукт поступает из блока перечистки 4 (II) сурьмы в отвальные хвосты. В блоках предварительного обогащения и перечистки используются флотомашины с принудительной подачей воздуха (16 м³), в перечистных операциях — механические флотомашины (8 м³).

Наиболее ценными индикаторами флотационного процесса золото-сурьмяной руды является содержание золота и сурьмы в хвостах. Алгоритм проведения локальных операций: операторы наблюдают за процессом пенообразования и определяют, соответствует ли размер пузырьков необходимым требованиям. В случае несоответствия проводится регулировка уровня пульпы и расхода реагента. Следует отметить, что операторам необходимо регулировать уровень пульпы и расход реагента, непрерывно наблюдая за пузырьками до тех пор, пока их размер не будет соответствовать стандарту. Соблюдение контроля расхода реагента в основной флотации напрямую влияет на показатели продукта на последующих стадиях обогащения в циклах флотации промпродукта и перечистках. В данном исследовании особое внимание уделено контролю расхода реагента в основной флотации сурьмы. Камеры установлены над блоками, где проводилось первичное обогащение сурьмы, флотации промпродукта и перечистка сурьмы с целью получения изображений пены (рис. 1).

Анализ размера пузырьков в процессе обогащения. От размера пузырьков зависит качество флотации. Если он слишком большой, они будут с легкостью лопаться, а частицы с ценными минеральными компонентами перейдут в хвосты, что уменьшит извлечение [7, 12]. Таким образом, размер пузырьков не должен быть слишком большим или слишком маленьким, так как это повлияет на извлечение и качество концентрата. Размер пузырьков отличается для разных видов руды и флотационных процессов. В общем для обогащения сульфидных руд пузырьки, имеющие диаметр 8-10 см и более, считаются большими, 3-5 см — средними, 1-2 см и меньше — маленькими. Размер пузырьков очень важен для визуального контроля при оценке операторами условий флотации.

Кроме того, размер пузырька соотносится с уровнем его минерализации. Если уровень минерализации высокий, пузырьки имеют средний размер, поэтому в операциях основной флотации и перечистках пузырьки чаще всего средние. Если уровень минерализации низкий, пузырьки могут сливаться и увеличиваться в размере. Чрезмерная минерализация предотвращает слияние, но при этом происходит образование нетипичных пузырьков. Для регулирования пенообразования обычно используются флотационные реагенты. Как правило, большее количество пенообразователя способствует уменьшению размера пузырька. При добавлении большего количества извести происходит увеличение размера пузырьков. Увеличение количества депрессора приводит к образованию более мелких пузырьков, поэтому необходимо изучать связь между расходом реагента и размером пузырька.

Рабочие параметры флотационного процесса. Во время флотации многие рабочие параметры и дестабилизирующие факторы (размер частиц, концентрация пульпы, качество загружаемого материала, температура и т. д.) могут напрямую влиять на характеристики пены, а впоследствии и на результат конечной флотации. Например, реагент, используемый в процессе флотационного обогащения, может изменить химические свойства пульпы, кроме того, повысить или снизить флотируемость минеральных частиц.

Собиратель применяется для извлечения ценных минералов, а также для повышения гидрофобных свойств поверхности минеральных частиц и улучшения сцепления частиц с пузырьками воздуха. Когда количество собирателя избыточно, избирательность флотационного процесса нарушается, что приводит к снижению качества концентрата. Если подается недостаточное количество собирателя, минеральные частицы не приобретают требуемую гидрофобность, что сказывается на снижении извлечения. Так, в процессе обогащения сурьмяной руды соответствующий размер пузырьков увеличивается с повышением количества ксантогената приблизительно пропорционально. При избытке ксантогената необходимо увеличить количество цианида (депрессора), что приведет не только к бесполезному расходу реагентов, но и к увеличению содержания реагентов в хвостах.

Внесение пенообразователя напрямую влияет на распределение пузырьков по размеру. Избыток пенообразователя — причина нестабильности пены, которая приводит к переполнению камеры. При недостаточном количестве пенообразователя пузырьки легко разрушаются, скорость движения пены к желобу пеносборника уменьшается. Когда количество пенообразователя превышено, стабильность и скорость движения пены также увеличиваются. К регуляторам относятся активаторы и сопутствующие реагенты. Активаторы применяются для повышения адсорбционной способности собирателя, а сопутствующие реагенты, такие как депрессоры, — для подавления нежелательных минеральных включений в процессе флотации. Наиболее часто используемые регуляторы — это известь, карбонат натрия, гидроксид натрия и серная кислота.

Исходя из представленного анализа, можно сделать вывод, что четкий контроль расхода реагента крайне важен для процесса флотационного обогащения, так как слишком большой или слишком малый расход может оказать неблагоприятное влияние. По этой причине эффективный контроль расхода реагента весьма актуален.

СТРАТЕГИЯ КОМБИНИРОВАННОГО КОНТРОЛЯ РАСХОДА РЕАГЕНТА

В совокупности с характеристиками пенообразования в процессе флотационного обогащения золото-сурьмяной руды предложена стратегия контроля на основе метода смешанной оптимизации. Стратегия контроля включает регулирование расхода реагента, основанное на отслеживании ФРСВ размера пузырьков, и контроль добавочного внесения реагента, основанный на использовании варианта модели прогнозирования при помощи распределительной системы машинного зрения. Схема стратегии контроля представлена на рис. 2.



Рис. 2. Структурная схема смешанного контроля расхода реагента для проведения флотационного обогащения

Сначала делаются снимки в камере перечистки сурьмы при внесении реагента, и полученные изображения обрабатываются при помощи алгоритма сегментации WaterShed [17]. Количество пены оценивается исходя из области нахождения пузырьков, которая определяется суммой количества пикселей для каждого выделенного пузырька. Затем рассчитывается ФРСВ размера пузырька при помощи ядерной функции и сопоставляется с оптимальным распределением пузырьков по размеру. Расход реагента в период T+1 обеспечивается оптимальным методом. После этого делаются снимки с целью контроля расхода вносимого реагента в течение следующего периода времени. Для добавочного внесения реагента задается интервал 8 мин, что превышает продолжительность протекания реакции.

Методика анализа изображений из разных камер в момент внесения реагента используется для прогнозирования качества хвостов золото-сурьмяной флотации [16]. Затем прогнозируемые значения сравниваются с целевыми для того, чтобы определить добавочный расход реагента для следующего периода.

Качество контроля учитывалось исходя из двух аспектов. Когда имеются заметные изменения в качестве исходного материала, ФРСВ размера пузырьков для оптимального пенообразования может быть мгновенно актуализирована в соответствии с накопленными данными и знаниями специалистов. Использовался метод контроля отслеживания ФРСВ для регулирования расхода реагента в целях обеспечения эффективности системы. При возникновении каких-либо факторов, нарушающих стабильное протекание флотационного процесса, должна применяться модель компенсации на базе нечеткой логики, чтобы скорректировать расход реагента согласно показателям отклонения. Таким образом, дестабилизирующее влияние на систему могло быть устранено, что позволило бы сохранить дальнейшее протекание процесса.

Контроль расхода реагента, основанный на функции распределения случайных величин размера пузырьков. Концепция использования контроля расхода реагента, основанная на распределении пузырьков по размеру, заключается в следующем: сначала используется метод ядерной оценки ФРСВ размера пузырьков. Затем применяется метод максимальной энтропии для определения параметров ядерной функции. После чего контроль расхода реагента достигается путем приближения итоговой ФРСВ к оптимально заданной.

Функция распределения случайных величин оптимизированного размера пузырьков основывается на наблюдениях за технологическим процессом и знаниях экспертов, полученных при работе с рудой с теми же свойствами в идентичных условиях. На практике опытные работники контролируют течение флотации, наблюдая за структурой пузырьков. При хорошем протекании флотационного процесса, когда размер пузырьков отражает высокое качество полученного концентрата по мнению опытных специалистов, ФРСВ размера пузырьков фиксируется и обрабатывается на основе полученных изображений пены. Одновременно с этим проводится сбор и анализ пенных продуктов. Таким образом получают набор данных, включая ФРСВ размера пузырьков и соответствующие параметры качества концентрата. В результате проведения тестов в ходе множества флотационных циклов имеется большое количество наборов данных. Функции распределения случайных величин размера пузырьков отбираются и анализируются с целью определения желаемой ФРСВ при помощи регрессивного метода в том случае, когда качество соответствующего концентрата относительно высокое.

Оценка размера пузырьков при помощи ядерной функции. Примем $x \in [a,d]$ — размер пузырька и $U(k) \in \mathbb{R}^m$ — расход реагента (вектор исходных данных) для системы. Выходной переменной системы является ФРСВ размера пузырьков. В любой момент времени k получаем $U(k) \rightarrow f(x, U(k))$, где f(x, U(k)) — ФРСВ размера пузырьков. На практике накопленная вероятность размера пузырьков в пределах диапазона [a, d] должна быть равна единице:

$$P(a \le x < d) = \int_{a}^{d} f(x, U(k)) dx = 1.$$
(1)

Для неизвестной функции распределения случайных вероятностей ядерная функция может эффективно определять функцию вероятности [15]. Метод ядерной оценки f(x) запишем в виде

$$\hat{f}_{ker}(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^{n} K\left(\frac{x - X_i}{h}\right),\tag{2}$$

где $X_i (1 \le i \le n)$, *n* — наблюдаемый размер пузырьков; K(x) — ядерная функция.

Имеем

$$\int_{R} K(x) dx = 1, \qquad (3)$$

здесь $K(x) \ge 0$; *h* — диапазон ядерной функции; *R* — интегральный промежуток.

Для сокращения количества выбранных ядерных функций и упрощения последующих вычислений нормальная ядерная функция может быть определена следующим образом:

$$K(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(\frac{-x^2}{2}\right), \quad -\infty < x < \infty.$$
(4)

127

Таким образом, ядерная оценка может быть выражена как

$$\hat{f}_{ker}(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp \frac{-\left(\frac{x - X_i}{h}\right)}{2}.$$
(5)

 $\tau \tau > 2$

Далее проводится расчет h, при котором значение асимптотической накопленной среднеквадратической ошибки для уравнения (5) минимально. Без учета дисперсии образца выбранное значение h является фиксированным, что неоправданно на практике.

В данном исследовании выполнен анализ ядерной оценки с использованием еще одного метода. Предположим, что образец X_i отобран из общего количества образцов и может рассматриваться как усредненный, а отклонения будут представлены диапазоном ядерной функции h_i . В том случае, когда вариант ядерной функции подобран, значение распределения полной вероятности в точке X_i рассчитывается при помощи уравнения

$$f_{i}(x) = \frac{1}{h_{i}} K \frac{x - X_{i}}{h_{i}} .$$
(6)

Полную оценку по выборке получим после суммирования и усреднения оценки образцов п:

$$\hat{f}_{ker}(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{h_i} K \frac{x - X_i}{h_i} \,. \tag{7}$$

Предположим, $w_i = 1/nh_i$, тогда уравнение (7) запишется как

$$\hat{f}_{ker}(x) = w_i \sum_{i=1}^{n} \left[\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp \frac{-(x - X_i)^2}{2h_i^2} \right],$$
(8)

где $w_i = 1/nh_i$ — соответствующее значение ядерной функции *i*.

При ядерной оценке плотности выбор диапазона функции очень важен. Когда диапазон h небольшой, функция плотности вероятности может быть описана более подробно при помощи ядерной функции. Однако небольшой диапазон h может повлечь за собой увеличение шумов и появление сообщений об ошибке. Напротив, большой диапазон h может включить в оценку слишком много выпуклостей. В связи с этим диапазон ядерной функции должен быть выбран в соответствии со степенью дисперсности образца. Например, большой диапазон h_i выбирает-

ся для более рассеянных областей, меньший — для образцов с большой плотностью. Следовательно, классический метод ядерной оценки с фиксированным диапазоном может быть улучшен до нового метода оценки при помощи ядерной функции с различными диапазонами.

Выбор параметров для ядерной оценки плотности. Метод ядерной оценки выбран для определения ФРСВ размеров пузырьков пены. Ключевым моментом являются значения параметров ядерной функции. К ним относятся диапазон и количество ядерных функций, которые напрямую влияют на точность модели.

Для определения диапазона ядерной оценки применялся метод максимальной энтропии [15, 18]. Энтропия информации случайной величины *х* имеет вид

$$H(f) = -\int_{\mathbb{R}} f(x) \ln f(x) dx \,. \tag{9}$$

Используя метод максимальной энтропии, оптимальная задача может быть выражена так:

$$\max H(f) = -\int_{R} f(x) \ln f(x) dx,$$

$$s.t. \quad \int_{R} f(x) dx = 1,$$

$$\int x^{j} f(x) dx = M_{i}, \quad j = 1, 2, \cdots, n,$$
(10)

где M_i — значение исходного момента *t*; *n* — значение наивысшей точки.

Путем подгонки f(x) энтропия информации может быть максимально увеличена. Подставляя (8) в (9), найем информационную энтропию оценки, полученную с использованием ядерной функции:

$$H(f) = -\int_{R} \left[\sum_{i=1}^{n} a_{i} K \frac{x - x_{i}}{h_{i}} \right] \ln \left[\sum_{i=1}^{n} a_{i} K \frac{x - x_{i}}{h_{i}} \right] dx.$$

$$(11)$$

Таким образом, задача по оптимизации может быть упрощена до $\max H(f)$:

s.t.
$$\int_{R} x^{j} f(x, U(x)) dx = M_{i} \quad j = 1, 2, \cdots, n$$
. (12)

Следует учесть два момента:

— для расчета (9) необходимо задать верхнюю и нижнюю границы диапазона интегрирования. Как правило, для определения этого диапазона используется область дисперсности образцов. В данном исследовании область дисперсности соответствовала диапазону распределения пузырьков пены;

— теоретически, чем большее количество ядерных функций выбрано, тем лучше должна быть выполнена оценка. Однако сложность алгоритма возрастает при увеличении *n*.

Для выбора подходящего количества ядерных функций проанализировано множество изображений пузырьков в процессе золото-сурьмяной минерализации (рис. 3*a*). Сначала изображения пузырьков обрабатываются при помощи алгоритма сегментации WaterShed (рис. 3*6*) [17]. Размер каждого пузырька находят путем измерения выделенной области, затем его упорядочивают с целью проведения оценки ФРСВ. Далее подбираются различные количества ядерных функций и выполняют оценку ФРСВ размера пузырьков. Результаты представлены на рис. 3*6*.

Исследование показывает, что пенообразование в реальном времени достигает оптимальных показателей при увеличении количества ядерных функций. Из (11) вытекает, что по мере увеличения одного параметра становится необходимым определить три дополнительных. По этой причине построение модели оказывается затруднительным.

Согласно рис. 3*в*, когда количество ядерных функций равно трем, точность будет низкой, а оцениваемая ФРСВ размера пузырьков может лишь приблизительно отражать распределение. ФРСВ будет наиболее точной, если количество ядерных функций равно шести. Принимая во внимание сложность модели и точность оценки, количество ядерных функций должно быть равно шести.

Контроль расхода реагента на основе алгоритма дифференциальной эволюции. Для успешного проведения контроля расхода реагента, с целью приблизиться к заданной ФРСВ, используется выходная ФРСВ. Показатели результативности устанавливаются как

$$J(U(t)) = \int_{a}^{d} (f(x, U(k)) - g(x, U_g))^2 dx, \qquad (13)$$

где $g(x, U_g)$ — ФРСВ оптимального пенообразования; f(x, U(k)) — ФРСВ пенообразования в реальном времени. Цель контроля — обеспечение максимально возможного сближения выходной ФРСВ с заданной, в частности min J(U(t)). По причине того, что выходная функция описывается группой ядерных функций, другое назначение показателей результативности заключается в разработке управляющего устройства, дающего возможность максимально сблизить параметры оценки выходной функции с параметрами оценки заданной функции.



Рис. 3. Ядерная оценка размера пузырьков: a — исходное изображение; δ — изображение после сегментации; e — с различным количеством ядерных функций: l — n = 3; 2 — n = 4; 3 — n = 5; 4 — n = 6; 5 — заданная ФРСВ

Так как форма ФРСВ размера пузырьков контролируется исходными данными U(t), проблема управления расходом реагента может рассматриваться как проблема оптимизации, учитывая, что выходная ФРСВ подгоняется под заданную. Оптимальным входным значением для контроля дозирования является такой расход реагента, который обеспечивает повышение показателей производительности. Алгоритм дифференциальной эволюции используется для оптимального регулирования расхода реагента [19, 20].

Контроль добавочного внесения реагента на основе модели прогнозирования. Существует множество неизученных дестабилизирующих факторов в процессе пенной флотации. Они могут привести к отклонениям параметров загрузки (например, плотность пульпы, размер частиц пульпы и качество загружаемого материала), которые оказывают влияние на ФРСВ размера пузырьков оптимального пенообразования. Как правило, от параметров загрузочного материала зависит качество концентрата и качество хвостов флотационного обогащения. Чтобы ослабить воздействие факторов, нарушающих равновесие, предложена методика сравнительного контроля расхода реагента, построенная на прогнозирующей модели качества минерального питания. Модуль управления добавочным внесением реагента включает прогнозирующую модель факторов эффективности на основе автоматического анализа распределительной системы машинного зрения, а также компенсационную модель на основе нечеткой логики. Модель прогнозирования при помощи распределительной системы машинного зрения. Учитывая единство, локальность и неточность существующих методов прогнозирования, основанных на машинном зрении, в [16] разработана распределительная система машинного зрения. На базе комплексной модели прогнозирования качества концентрата утверждена модель прогнозирования качества флотационных хвостов в процессе золото-сурьмяного обогащения (рис. 4). Эта система включает модули сбора информации и предварительной обработки, модель прогнозирования качества хвостов и модель компенсации погрешности.



Рис. 4. Стратегия моделирования качества хвостов золото-сурьмяного обогащения: y_c — выходное значение для модели прогнозирования качества хвостов при первичной флотации; Δy_c выходное значение для компенсационной модели на основе полученного опыта; Δy_p — выходное значение компенсационной интеллектуальной модели; $y_k(k-\tau)$, $y_c(k-\tau)$ — фактическое и предполагаемое значение качества хвостов при $k-\tau$; τ — время задержки; $\Delta y'$ — выходное значение эксперта-координатора; y'_c — выходное значение для объединенного режима. Более подробное описание представлено в [16]

Представлено 410 групп образцов, полученных с февраля по июнь 2014 г. в процессе проведения золото-сурьмяного обогащения. Интервал отбора проб составлял 8 ч, учитывая время задержки в разных флотационных камерах. Данные группировались по парам в соответствии с параметрами времени и места. После предварительной обработки отобраны 345 групп для подготовки модели прогнозирования, остальные 65 групп служили в качестве контрольной выборки с предварительно смоделированными значениями и относительными отклонениями (рис. 5, 6). На рис. 5 приведены прогностические значения для качества хвостов Au и Sb, на рис. 6 — относительные значения погрешности. Показано, что при помощи прогнозирующей модели можно эффективно отследить значение качество флотационных хвостов, и точность прогноза данной модели удовлетворяет требованиям. Предел относительной погрешности составляет 6%.



Рис. 5. Результаты прогноза комплексной модели с фактическими значениями: *a* — Au; *б* — Sb



Рис. 6. Ошибки прогнозирования комплексной модели: *a* — Au; *б* — Sb

Для дальнейшего обоснования эффективности модели прогнозирования использованы максимальная относительная погрешность прогнозирования $E_{\rm max}$ и среднеквадратичная ошибка (СКО). Для качества хвостов золото-сурьмяного обогащения $E_{\rm max}$ составила 5.42 и 5.26% соответственно, что свидетельствует о высокой точности прогнозирования. Среднеквадратичная ошибка была равна 0.6913 и 0.7152, указывая на хороший показатель обобщения.

Компенсационная модель на основе нечеткой логики. Во время флотации контроль расхода реагента осуществляется преимущественно с помощью эксперт-контроллеров и обоснований на базе нечеткой логики. В [9] представлен анализ взаимосвязей между параметрами изображения и качеством/извлечением концентрата, а также разработан контроллер на базе экспертного правила, внедренный в схему цинковой флотации. Полученные результаты указывают, что с применением обновленной стратегии системы контроля стало возможным значительное повышение экономической выгоды. При этом эффективность контроля может быть увеличена с использованием эксперт-контроллеров на базе нечеткой логики.

Предложен также оптимальный смешанный метод контроля с интеллектуальной поддержкой, включающий в себя модель предварительных установок, основанную на методе сравнения с аналогичными ситуациями, а также компенсатор на основе метода обоснования с применением экспертного правила. Однако появление этих стратегий выявило некоторые проблемы: (1) большое количество параметров, описывающих характеристики пузырьков, приводит к возникновению большой базы экспертных правил, что вызывает сложности и проблемы их систематизации, так как все взаимосвязи между особенностями и показателями эффективности должны быть отображены; (2) все правила должны каждый раз анализироваться и повторно согласовываться. При данных условиях невозможно использовать экспертные правила в рамках машинного обучения. Они становятся неэффективными, поскольку не обладают способностью к автоматическому обновлению.

Для регулирования добавочного внесения реагента предложена компенсационная модель с применением обоснований на базе нечеткой логики, способная к машинному обучению. Модель добавочного внесения реагента во время флотационного процесса показана на рис. 7. Она включает подготовку задачи к решению методом нечеткой логики на основе обоснований с использованием алгоритма обратного распространения (OP) и нейронных сетей (HP), а также приведение к четкости. Связь между входными и выходными данными контроллера на базе нечеткой логики может быть выражена в виде

$$\Delta U_1(k) = f(\Delta W_{Au}(k), \Delta W_{Sb}(k) | \psi), \qquad (14)$$

где $f(\cdot|\psi)$ — параметры ψ нечеткой функции; $\Delta W_{Au}(k)$ — расхождение между целевым и прогнозируемым значением качества хвостов в процессе извлечения золота при значении k; $\Delta W_{Sb}(k)$ — расхождение между целевым и прогнозируемым значением качества хвостов в процессе извлечения сурьмы при значении k; ΔU_1 — количество добавочного внесения реагента при значении k.



Рис. 7. Модель добавочного внесения реагента при флотационном обогащении: *1* — входной слой; *2* — скрытый слой; *3* — выходной слой; *4* — обоснование с помощью ОР – HC алгоритмов на базе нечеткой логики

Параметры ограничений для индикатора хвостов золото-сурьмяного обогащения:

$$W_{\rm Sb} \le W_{\rm Sb\,max}, \ W_{\rm Au} \le W_{\rm Au\,max}, \tag{15}$$

где W_{Sbmax} — верхний предел качества хвостов при извлечении сурьмы (0.13 %), целевое значение; W_{Aumax} — верхний предел качества хвостов при извлечении золота (0.33 г/т), целевое значение; W_{Sb} и W_{Au} — прогнозируемые значения в процессе золото-сурьмяного обогащения; ΔW_{Sb} и ΔW_{Au} — расхождения между целевым и прогнозируемым значениями в процессе извлечения сурьмы и золота. Формула для расчета выглядит следующим образом:

$$\Delta W_{\rm Sb} = W_{\rm Sb\,max} - W_{\rm Sb} \,, \quad \Delta W_{\rm Au} = W_{\rm Au\,max} - W_{\rm Au} \,. \tag{16}$$

Для осуществления контроля добавочного внесения реагента при помощи средств нечеткой логики разработаны правила на основе опыта экспертных систем и знаний в предметной области. Расхождения значений качества хвостов при извлечении золота и сурьмы вносятся при помощи семантической системы ввода, а полученные при помощи нечеткой логики значения вывода должны быть приведены к четким фактическим значениям. Запишем области расхождений для качества хвостов при извлечении сурьмы $\Delta W_{\rm sb}$, расхождений для качества хвостов при извлечении сурьмы $\Delta W_{\rm sb}$, расхождений для качества хвостов при извлечении сурьмы $\Delta W_{\rm sb}$, расхождений для качества хвостов при извлечении золота $\Delta W_{\rm Au}$ и отклонения для расхода реагента ΔU_1 : $[-\Delta W_{\rm Sbmax}, \Delta W_{\rm Sbmax}]$, $[-\Delta W_{\rm Aumax}, \Delta W_{\rm Aumax}]$ и $[-\Delta U_{\rm 1max}, \Delta U_{\rm 1max}]$. Области семантических значений ΔW_1 , ΔW_2 и ΔU_1^* представляют собой $[-n, \dots, 0, \dots, n]$, $[-m, \dots, 0, \dots, m-1, m]$ и $[-l, \dots, 0, \dots, l-1, l]$ соответственно. Таким образом, коэффициенты пересчета могут быть выражены в виде

$$k_1 = n / \Delta W_1, \quad k_2 = m / \Delta W_2, \quad k_u = \Delta U_{1 \max} / l.$$
 (17)

Нечеткими подмножествами для ΔW_1 и ΔW_2 будут {NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB}, которые означают, соответственно, большое отрицательное, среднее отрицательное, малое отрицательное, нулевое, малое положительное, среднее положительное, большое положи-

тельное. Все они выражаются треугольными функциями принадлежности; ΔU^* определяется девятью нечеткими подмножествами от очень большого отрицательного до очень большого положительного (NL, NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB, PL). На основе опыта использования нечеткой логики в процессе обогащения в табл. 1 представлены правила для системы нечеткой логики [21].

Согласно практическому опыту, когда качество хвостов при извлечении золота и сурьмы ниже целевых значений, области расхождения ΔW_1 и ΔW_2 являются малыми, а значение добавочного расхода реагента ΔU_1 должно быть равно нулю. Если качество хвостов при извлечении золота и сурьмы выше целевых значений, это указывает на то, что расход реагента слишком мал, что приведет к потерям ценных минеральных веществ. Значит, ΔU_1 должно быть положительным большим. Если качество хвостов при извлечении золота и сурьмы выше целевых значений, это указывает на то, что расход реагента слишком мал, что приведет к потерям ценных минеральных веществ. Значит, ΔU_1 должно быть положительным большим. Если качество хвостов при извлечении золота и сурьмы намного ниже целевых значений, могут возникнуть две проблемы. Первая заключается в низком качестве концентрата, вторая — в большом расходе реагента. Вследствие этого ΔU_1 устанавливается на отрицательном среднем, в соответствии с данными операторов (табл. 1).

ΔU_1^*		ΔW_2						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
	NB	PL	PL	PB	PM	PM	PS	PS
	NM	PL	PB	PM	PS	PS	PS	PS
ΔW_1	NS	PB	PM	PS	PS	PS	PS	PS
	ZO	PM	PM	PS	ZO	ZO	ZO	NS
	PS	PM	PS	PS	ZO	ZO	ZO	NS
	PM	PS	PS	PS	ZO	ZO	NS	NM
	PB	PS	PS	PS	NS	NS	NM	NB

ТАБЛИЦА 1. Правила компенсации с использованием нечеткой логики

В табл. 1 каждый элемент представляет правило для системы нечеткой логики, что в итоге составляет $7 \times 7 = 49$ правил. Например, первое правило выглядит следующим образом: если $\Delta W_1 = NB$ и $\Delta W_2 = NB$, то $\Delta U_1^* = PL$.

После определения функций принадлежности и правил нечеткой логики для ввода в Matlab получаем поверхность выходов нечеткой системы (рис. 8), где *X*, *Y* и *Z* соответствуют $\Delta W_{\rm Sb}$, $\Delta W_{\rm Au}$, ΔU_1^* .



Рис. 8. Поверхность выходов нечеткой системы

Результатом применения алгоритма нечеткой логики является нечеткое множество, которое отражает принадлежность различных элементов в пространстве выходных переменных. Для точного определения расхода реагента используется метод максимальной дефаззификации.

Анализ на основе нечеткой логики проводится при помощи алгоритма обратного распространения как одного из методов обучения нейронных сетей, посредством изменения правил логического вывода на соответствующие модели входа и выхода нейронной сети. Каждый узел входного слоя представляет заданные величины ΔW_1 и ΔW_2 , а каждый узел выходного слоя заданную величину ΔU . Количество узлов в скрытом слое определяется при помощи теоремы Колмогорова. Нечеткая нейронная сеть имеет структуру 26-16-9, а веса связей устанавливаются произвольно.

Параметры компенсационной модели на базе нечеткой логики, основанной на методе нейронной сети с обратным распространением, имеют следующие значения: $\Delta W_{Sbmax} = 0.07$,

 $\Delta W_{\text{Aumax}} = 0.1$ и $\Delta U_{\text{max}} = 20$, ΔW_1 и $\Delta W_2 \in [-6, 6] \subset Z$ и $\Delta U_1^* \in [-4, 4] \subset Z$.

Действительные числа в промежутке [-1, 1] выбираются случайным образом для определения весов связей при скорости обучения $\eta = 0.32$. Правила на основе опытных данных устанавливаются после большого количества циклов обучения, проведенных в автономном режиме или в реальном времени. В соответствии с учетом порога ошибок абсолютное значение погрешности для 49 полученных правил составляет менее 5% и может быть использовано для расчета добавочного расхода реагента. При определении отклонения качества для выборки, не участвовавшей в обучении, модель может обнаружить оптимальный выход посредством ассоциативной памяти, обеспечивающей максимальную близость фактического выхода к заданной величине. Наконец, регулирование компенсационного значения для уровня пульпы может быть аргументировано и скорректировано в соответствии с условиями флотации в реальном времени. Данная методика не требует сложных вычислений, при этом увеличивается эффективность обоснования и обучение может осуществляться в неконтролируемом режиме с увеличением накапливаемого опыта.

После продолжительного обучения в автономном режиме и режиме реального времени модель может запоминать правила, основанные на опыте. Так, в соответствии с условиями флотации в реальном времени можно определить значение добавочного расхода реагента. Данный метод повышает эффективность нечеткой логики без необходимости масштабных вычислений, и обучение может проходить в автоматическом режиме путем тренировки с использованием накопленного опыта.

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ И РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА

Для осуществления контроля за расходом реагента в соответствии с предложенным методом проведен ряд производственных экспериментов на фабрике по флотационному обогащению золото-сурьмяной руды в Китае. Комплект измерительного оборудования показан на рис. 9, подробное описание дано в [12].

Во время флотационного процесса каждые 30 мин операторы берут один образец на проверку и протоколирование, включая исходную пульпу, пену в отсеке основной флотации, пульпу из отсека основной флотации и в конечном итоге пену в камере очистки, хвостовую пульпу после перечистки и т. д. В то же время фиксируются текущие данные системы мониторинга о расходе реагента, уровне пульпы и потоке руды.



Рис. 9. Комплект оборудования для получения изображений

На фабрике по обогащению золото-сурьмяной руды в качестве основных реагентов используются ксантогенат и аэрофлот. Устанавливают следующие параметры алгоритма дифференциальной эволюции: объем генеральной совокупности 100, пороговое значение 10^{-6} , пересекающийся фактор 0.1, изменяемость данных оператора 0.2. Количество ядерных функций оценки плотности — 6, а ширина ядерной функции h_i находится методом максимальной энтропии. Корректировка вносимого расхода реагента проводилась каждые 8 мин. Как уже отмечалось, показатель размера пузырьков тесно связан с качеством руды, от чего зависит качество концентрата. Другими словами, следует сохранять постоянство качества руды в течение всего эксперимента. С целью осуществления сопроводительного контроля необходимо определить ФРСВ размера пузырьков, а расход реагента рассчитывать в соответствии с предложенным методом.

На рис. 10a, δ показан расход ксантогената и аэрофлота, используемый в трех разных методиках (ручной режим, ФРСВ размера пузырьков и ФРСВ + FC) и отражены тенденции изменения расхода реагента с использованием различных методов при возникновении факторов, нарушающих равновесие во время первичной флотации (рис. 10e, c).



Рис. 10. Сравнение трех методов расхода реагентов (*a* — аэрофлота; *б* — ксантогената) и реагентов в присутствии дестабилизирующих факторов (*в* — ксантогената; *г* — аэрофлота)

Как видно из рис. 10a, b, расход реагента, рассчитанный путем применения метода ФРСВ + FC, соответствует режиму ручной настройки. На рис. 10e, c представлен метод, предложенный в настоящей работе, который является более удобным в условиях действующих колебаний, чем метод контроля с отслеживанием ФРСВ размера пузырьков. Кроме того, он обладает характеристиками макрометрической регулировки и настройки нескольких параметров.

Для оценки эффективности методики, применяемой в процессе обогащения сурьмяной руды, в течение 28 дней проводилось производственное тестирование. Для оценки эффективности рекомендованного метода сравнивались производственные показатели, полученные по рассматриваемой методике, с теми, что были получены на фабрике. Сравнение расхода реагента выполнялось по вышеописанному принципу.

В настоящее время на фабрике установлен трехсменный график: утренняя смена, дневная и вечерняя. Эксперимент с использованием предложенного метода осуществлялся в дневную смену, а во время утренней и вечерней смен использовался режим ручной установки. Расход вносимого реагента регулировался согласно предложенному методу. Если увеличение или снижение расхода реагента составляло более 20 мл/мин, система контроля предупреждала о том, что необходимо скорректировать уровень пульпы. После этого работники просматривали изображения пены и регулировали уровень пульпы. В табл. 2 приведены параметры процесса золото-сурьмяной флотации во время производственного эксперимента. Под качеством загрузки подразумевается массовое соотношение загружаемых материалов. Для выражения концентрации пульпы использовали процентное содержание, т. е. долю твердых веществ в пульпе. Под размером частиц подразумевалась степень измельчения, выраженная процентным содержанием частиц крупностью менее 200 (-0.075 мм).

Показатель	Качество за	гружаемой руды	Концентрация пульпы, %	рН пульпы	Размер частиц, %
	сурьмяной, %	золотосодержащей, г/т			
Min	1.5	1.4	27	9.6	57
Max	1.8	1.8	38	10.4	66

ТАБЛИЦА 2. Параметры флотационного процесса

В целом параметры флотации не изменялись на протяжении всех смен. Если рабочие в процессе флотации выявляли отклонения, то расход реагента и уровень пульпы регулировались только в течение дневной и вечерней смен. На рис. 11 показано качество загружаемого материала, хвостов и концентрата в каждую смену во время проведения эксперимента.

Как видно из рис. 116, в, предложенный метод повысил качество хвостов и уменьшил количество колебаний по сравнению с режимом ручных установок. Причина несовершенства ручного управления заключается в несвоевременном регулировании расхода реагента и в хаотичности данного режима. На рис. 11г все значения качества концентрата сурьмы превышают 32%, что удовлетворяет потребностям предприятия. Отклонения по качеству концентрата во время дневной смены меньше по сравнению с другими сменами.

На рис. 12 приведен расход аэрофлота и ксантогената в камере первичной флотации для каждой смены при проведении производственного эксперимента. Желаемый показатель качества хвостов золото-сурьмяной флотации должен быть ниже 1.3 и 0.33 % соответственно. В табл. 3 представлены показатели промышленного эксперимента; номера сорта для качества хвостов Au, согласно установленным требованиям, во время дневной, утренней и вечерней смен — 26, 24 и 23 соответственно; номера сорта для качества хвостов Sb — 27, 26 и 25 соответственно.



Смены: → утренняя → дневная → вечерняя; • целевое значение качества концентрата Рис. 11. Качество исходного материала, хвостов и концентрата для каждой смены в период проведения эксперимента: *a* — загружаемый материал Sb; *б* — хвосты Sb; *в* — хвосты Au; *г* — концентрат Sb

Как следует из табл. 3, показатели дневной смены выше показателей других смен. Стандартное отклонение указывает на то, что по сравнению со значениями, полученными при использовании ручного режима, диапазон колебаний качества хвостов Au и Sb при проведении производственного эксперимента значительно меньше [22].



Рис. 12. Расход реагентов для каждой смены в период проведения эксперимента: *а* — аэрофлота; *б* — ксантогената

Таким образом, система более устойчива в условиях предложенного контроля дозировки реагента. Сравним расход реагента для разных смен в ходе выполнения эксперимента: расход аэрофлота в вечернюю смену — 272160, утреннюю — 276483, дневную — 266400 мл/день; расход ксантогената в вечернюю смену — 329760, утреннюю — 338400, дневную — 318240 мл/день. Видно, что расход реагента в дневную смену значительно ниже по сравнению с другими сменами.

		-	
Смена	Параметр	Au	Sb
Вечерняя	Уровень качества хвостов, %	82	89
	Стандартное отклонение σ	0.0386	0.0234
Утренняя	Уровень качества хвостов, %	86	93
	Стандартное отклонение σ	0.0340	0.0192
Дневная	Уровень качества хвостов, %	93	96
	Стандартное отклонение σ	0.0313	0.0128

ТАБЛИЦА 3. Результаты сравнения показателей для разных смен

Таким образом, предложенный метод может не только снизить содержание золота и сурьмы в хвостах и уменьшить расход реагентов, но также улучшить коэффициент использования и извлечения металлов, повысить экономическую выгоду предприятия.

выводы

Предложена методика контроля расхода реагента-собирателя в процессе флотации сурьмяных руд, состоящая из двух частей: отслеживание расхода вносимого реагента, основанное на функции распределения случайных величин пенообразования, и контроль добавочного расхода реагента, основанный на модели прогнозирования при помощи распределительной системы машинного зрения. Метод применен на фабрике по обогащению золото-сурьмяной руды, в результате чего сократилось содержание золота и сурьмы во флотационных хвостах, что повысило их качественные показатели. Снизилось также влияние дестабилизирующих факторов и улучшились устойчивость и эффективность флотационного процесса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Bergh L. G. and Yianatos J. B. The long way toward multivariate predictive control of flotation processes, J. of Process Control, 2011, Vol. 21, No. 2. — P. 226–234.
- Shean B. J. and Cilliers J. J. A review of froth flotation control, Int. J. of Min. Proc., 2011, Vol. 100, No. 3-4. — P. 57-71.
- Supomo A., Yap E., Zheng X., and Banini G. PT Freeport Indonesia's mass-pull control strategy for rougher flotation, Min. Eng., 2008, Vol. 21, No. 12–14. — P. 808–816.
- 4. Hodouin D., Jämsä-Jounela S. L., Carvalho M. T., and Bergh L. State of the art and challenges in mineral processing control, Control Eng. Practice, 2001, Vol. 9, No. 9. P. 995–1005.
- Kämpjärvi P. and Jämsä-Jounela S. L. Level control strategies for flotation cells, Min. Eng., 2003, Vol. 16, No. 11. – P. 1061–1068.
- 6. Bulatovic S. M. Handbook of flotation reagents, Chemistry, Theory and Practice: Flotation of Sulfide Ores. Retrieved, 2007, No. 4 (12), 2013.
- 7. Kaartinen J. Machine vision in measurement and control of mineral concentration process, 2009.
- Ylinen R., Miettunen J., Molander M., and Siliamaa E. R. Vision-and model-based control of flotation, In: Future trends in automation in mineral and metal processing, IFAC MM 2000, Finland, 2000, 22–24 August. — P. 475–480.
- **9. Kaartinen J., Hätönen J., Hyötyniemi H., and Miettunen J.** Machine-vision-based control of zinc flotation—a case study, Control Eng. Practice, 2006, Vol. 14, No. 12. P. 1455-1466.
- Liu J. J., MacGregor J. F., Duchesne C., and Bartolacci, G. Flotation froth monitoring using multiresolutional multivariate image analysis, Min. Eng., 2005, Vol. 18, No. 1. — P. 65–76.
- Laurila H., Karesvuori J., and Tiili O. Strategies for instrumentation and control of flotation circuits. Mineral Processing Plant Design, Practice and Control, 2002, Vol. 2. — P. 2174–2195.
- 12. Xu C., Gui W., Yang C., Zhu H., Lin Y., and Shi C. Flotation process fault detection using output PDF of bubble size distribution, Min. Eng., 2012, Vol. 26. P. 5–12.
- 13. Zhu J., Gui, W., Yang C., Liu J., and Tang Y. Probability density function of bubble size based reagent dosage control for flotation process, Asian J. of Control, 2014, Vol. 16, No. 3. P. 765–777.
- 14. Wang H. Bounded dynamic stochastic systems: modelling and control, Springer, 2000.
- Mohammad Saberali S., Amindavar H., and Ritcey J. A. Blind detection in symmetric non-Gaussian noise with unknown PDF using maximum entropy method with moment generating function constraints, Signal Processing, 2010, Vol. 90, No. 3. — P. 891–899.

- 16. Cao B., Xie, Y., Gui W., Wei L., and Yang C. Integrated prediction model of bauxite concentrate grade based on distributed machine vision, Min. Eng., 2013, Vol. 53. P. 31–38.
- Zhou K. J., Yang C. H., Gui W. H., and Xu C. H. Clustering-driven watershed adaptive segmentation of bubble image, J. of Central South University of Technology, 2010, Vol. 17, No 5. — P. 1049–1057.
- Wang H. Minimum entropy control of non-Gaussian dynamic stochastic systems, IEEE Tran. Automatic Control, 2002, Vol. 47, No. 2. — P. 398–403.
- **19.** Lu X., Tang K., Sendhoff B., and Yao X. A new self-adaptation scheme for differential evolution, Neurocomputing, 2014, Vol. 146. P. 2–16.
- **20.** Storn R. and Price K. Differential evolution-a simple and efficient adaptive scheme for global optimization over continuous spaces, Berkeley: ICSI, 1995.
- 21. Yi-Zhang J., Zhao-Hong D., and Shi-Tong W. Mamdani-Larsen type transfer learning fuzzy system, Acta Automatica Sinica, 2012, Vol. 38, No. 9. P. 1393–1409.
- **22.** Li Y., Gui W., et.al. Optimal control for zinc solution purification based on interacting CSTR models, J. of Process Control, 2012, Vol. 22, No. 10. P. 1878–1889.

Поступила в редакцию 12/IV 2018 После доработки 18/XI 2018 Принята к публикации 28/V 2019