

Управление процессом и прогнозирование выщелачивания сырья с применением гидроакустического излучателя*

Л.С. Стрижко^{1 a}, Ш. Бобозода^{2 b}, А.О. Новаковская^{3 c}, И.Р. Бобоев^{1 d}

¹Национальный исследовательский технологический университет, Ленинский пр. 4, Москва, Россия

²Министерство промышленности и новых технологий Республики Таджикистан, ул. Рудаки 22, Душанбе, Таджикистан

³Донецкий национальный университет, ул. 600-летия 21, Винница, Украина

^asls_2007.47@mail.ru, ^bbobev-i@mail.ru, ^cmy_anna@mail.ru, ^dboboevi@mail.ru

Статья поступила 5.10.2014, принята 20.11.2014

Статья посвящена одной из актуальных для золотодобывающей промышленности задач — созданию технологических агрегатов, предусматривающих автоматические и автоматизированные режимы управления. В мировой практике потери при переработке золотосодержащего сырья из-за несовершенства автоматизированной системы управления процессом цианирования, который применяется в основном на коренных месторождениях, составляют 20 % от общего содержания золота в исходном сырье. В настоящей работе на основе ранее разработанной технологической схемы приводится математическая модель извлечения золота из сырья с помощью гидроакустического излучателя, применяющегося для вскрытия золотин и повышения концентрации растворенного кислорода. Данная модель позволяет в любой момент времени прогнозировать неизмеряемые показатели растворения золота и серебра, расход цианида. На основе модельного прогноза реализован алгоритм системы управления, позволяющий поддерживать постоянную концентрацию цианида и кислорода, что, в конечном итоге, позволяет снизить потери золота с хвостами. В статье рассматривается двухуровневая структура системы управления процессом: верхний — управление последовательностью переключения агрегатов и режимов их работы, нижний — управление кинетикой растворения золота и серебра в каждом пачуке, где установлены гидроакустические излучатели. Предложенный алгоритм системы управления позволяет в согласовании с протекающим процессом управлять скоростью растворения золота и серебра из золотосодержащего сырья для процесса цианирования с применением гидроакустических излучателей. Реализация положений, изложенных в работе, позволяет достичь снижения потерь золота с хвостами и за счет постоянной подпитки раствора недостающими реагентами уменьшить продолжительность выщелачивания, что в конечном итоге обеспечивает увеличение производительности фабрики.

Ключевые слова: золото, цианирование, математическая модель, золотосодержащее сырье, система управления.

Process control and forecasting the leaching of raw materials by using hydroacoustic radiator

L.S. Strizhko^{1 a}, Sh. Bobozoda^{2 b}, A.O. Novakovskaya^{3 c}, I.R. Boboev^{1 d}

¹National University of Science and Technology; 4, Leninsky Prospect, Moscow, Russia

²Ministry of Industry and New Technologies of the Republic of Tajikistan; 22, Rudaki St., Dushanbe, Tajikistan

³Donetsk National University; 21, 600-richya St., Vinnytsia, Ukraine

Received 05.10.2014, accepted 20.11.2014

This article is devoted to one of the most urgent problem of the gold mining industry such as creation of technological units, providing automatic and automated control modes. In world practice, gold losses during processing of gold-bearing raw materials from primary deposits, caused by imperfections of the automated control system of the cyanidation process, represent 20% of total gold content in the source raw material. Prior to this research a mathematical model for extracting gold from raw materials was developed by using sonar emitter contributing break of gold particles and increased concentrations of dissolved oxygen. The model allows predicting non-measurable indicators of gold and silver dissolution, and cyanide consumption at any given time. Based on the model forecast, an algorithm of the control system has been developed that allows maintaining a constant concentration of cyanide and oxygen, which ultimately reduces the loss of gold tailings. The article deals with a two-level structure of the process control system where the high level provides control for sequence device switching and its work modes, the low is related to the control of gold and silver dissolution kinetics in every device (Pachuca) with hydroacoustic radiators. The algorithm of the control system that was developed allows controlling the dissolution rate of gold and silver from gold-bearing raw materials for the cyanidation process using sonar transducers.

Key words: gold, cyanidation, mathematical model, gold-containing raw material, control system.

Введение. В современных условиях актуальным является создание технологических агрегатов, предусматривающих автоматические и автоматизированные режимы управления. Одной из насущных задач золотодобывающей промышленности является эффективное извлечение ценных компонентов из золотосодержащего сырья интенсификационными способами [1 – 5]. Для решения этой задачи на основании проведенных исследований [6 – 10] была

предложена технологическая схема извлечения золота из золотосодержащего сырья с применением гидроакустического излучателя, способствующего вскрытию золотин и повышению концентрации растворенного кислорода в пульпе, вследствие чего значительно увеличивается извлечение золота.

На рис. 1. представлена схема цепи аппаратов для извлечения.

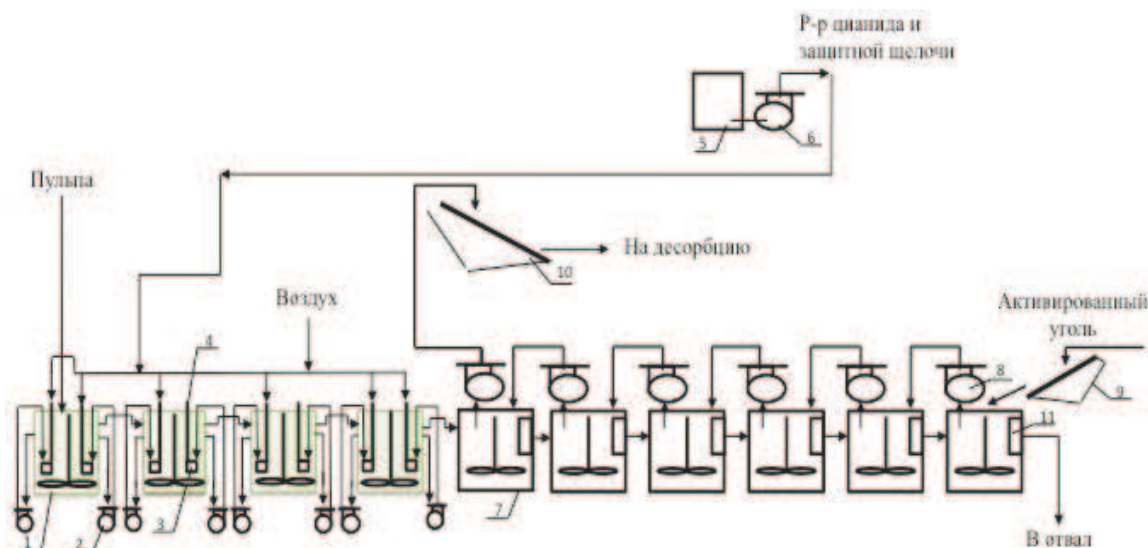


Рис. 1. Схема цепи аппаратов при непрерывном цианировании пульпы

По

этой схеме в первых четырех пачуках, в которых установлены гидроакустические излучатели 3, происходит последовательное цианирование. Общее время выщелачивания составляет 6 часов. Контроль за концентрацией цианида, кислорода и щелочи ведется в 4-х агитаторах, и в случае необходимости цианид дозируется из емкости 5 в трубу 4 гидроакустического излучателя. Пульпа после цианирования направляется в пачуки 7 для сорбции золота и серебра. Пульпа и уголь движутся противотоком.

Методика расчета. Система управления процессом предусматривает два уровня. На верхнем уровне осуществляется управление последовательностью агрегатов и переключение режимов их работы. На нижнем уровне реализуется управление кинетикой процесса извлечения золота и серебра в каждом пачуке за счет изменения режимов работы установленных гидроакустических излучателей.

В данной работе рассматривается задача прогнозирования скорости растворения золота и серебра из золотосодержащего сырья. Решение задачи прогнозирования позволяет осуществлять управление процессом цианирования с применением гидроакустических излучателей в ритме с протекающим процессом.

Предложена динамическая математическая модель цианирования золотосодержащего сырья, позволяющая прогнозировать скорость изменения компонент процесса. Согласно технологическим особенностям

агрегата его рабочий объем может быть декомпозирован на две псевдооднородные зоны (рис. 2). Под псевдооднородностью понимается совокупность близких фазовых состояний, протекающих реакций и концентраций компонент. Признаки псевдооднородности первой зоны: газожидкостная среда, пронизываемая аэрацией. Вторая зона: жидкая фаза, содержащая твердые частицы.

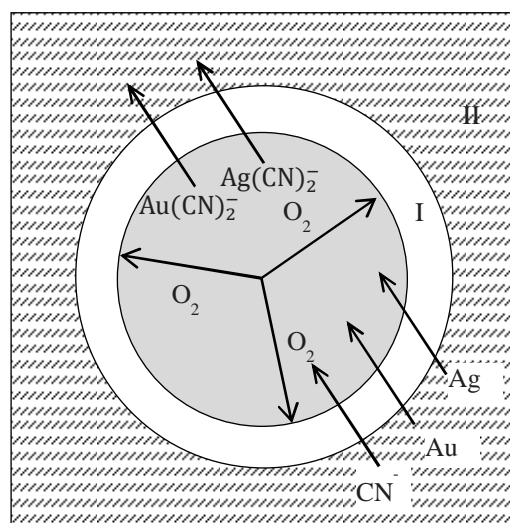
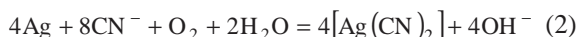


Рис. 2. Декомпозиция рабочего объема на псевдооднородные зоны (I — 1-я зона, II — 2-я зона)

Согласно произведенной декомпозиции предложен следующий механизм протекания процессов.

1-я зона получает из 2-й зоны пульпу, содержащую золото, серебро и цианид-ионы. Кроме того, от реактора 1-я зона получает кислород с помощью излучателя. В этой зоне протекают следующие реакции цианирования [7; 8]:



1-я зона передает во 2-ю зону продукты реакции (1) и (2) — цианидные комплексы золота и серебра, а также гидроксид-ионы.

В данной гипотезе приняты следующие допущения:

- 1) реакции (1) и (2) стехиометричны;
- 2) примеси и породообразующие минералы, содержащиеся в сырье, не учитываются;
- 3) плотность зоны аддитивна относительно плотностей компонент и их концентраций;
- 4) протекание реакций (1) и (2) во 2-й зоне не учитывается в связи с отсутствием кислорода.

В соответствии с принятой гипотезой о механизме процесса разработаны уравнения динамической модели, позволяющей прогнозировать кинетику процесса растворения золота и серебра из золотосодержащего сырья. Структурно модель состоит из двух подмоделей, описывающих процессы в каждой зоне.

Подмодель 1-й зоны приведена в виде системы уравнений, описывающих явления в этой зоне.

Изменение количества Au:

$$\frac{dG_1^{\text{Au}}}{dt} = \beta_1 F \gamma_2 ([\text{Au}]_2 - [\text{Au}]_1) - g_{\text{Au}}^*$$

Изменение количества Ag:

$$\frac{dG_1^{\text{Ag}}}{dt} = \beta_1 F \gamma_2 ([\text{Ag}]_2 - [\text{Ag}]_1) - g_{\text{Ag}}^*$$

где β_1 — коэффициент массопереноса из 2-й зоны в 1-ю, м/с; F — площадь контакта 1-й и 2-й зон, м²; γ_2 — плотность 2-й зоны, кг/м³; $[\text{Au}]_2$ — концентрация Au во 2-й зоне, доля; $[\text{Au}]_1$ — концентрация Au, потребленного в 1-й зоне по реакции (1), доля; $[\text{Ag}]_1$, $[\text{Ag}]_2$ — концентрация Ag в 1-й и 2-й зонах, доля; g_{Au}^* — количество Au, прореагировавшего по реакции (1), кг/с; g_{Ag}^* — количество Ag, прореагировавшего по реакции (2), кг/с.

Изменение количества цианида в 1-й зоне:

$$\frac{dG_1^{\text{CN}^-}}{dt} = \beta_1 F \gamma_2 ([\text{CN}^-]_2 - [\text{CN}^-]_1) - \chi_{\text{Ag}}^{\text{CN}^-} g_{\text{Ag}}^* - \chi_{\text{Au}}^{\text{CN}^-} g_{\text{Au}}^*$$

где $\chi_{\text{Au}}^{\text{CN}^-}$ — коэффициент стехиометрического соотношения в реакции 1.

Изменение количества кислорода:

$$\frac{dG_1^{\text{O}_2}}{dt} = -\chi_{\text{Au}}^{\text{O}_2} g_{\text{Au}}^* - \chi_{\text{Ag}}^{\text{O}_2} g_{\text{Ag}}^* + g_{\text{aer}}$$

где g_{aer} — расход кислорода, подаваемого в 1-ю зону, кг/с.

Расчет изменения количества продуктов реакций (1) и (2).

Изменение количества $\text{Au}(\text{CN})_2$ в 1-й зоне:

$$\frac{dG_1^{\text{Au}(\text{CN})_2}}{dt} = \chi_{[\text{Au}(\text{CN})_2]}^{\text{Au}} g_{\text{Au}}^* - \beta_1 F \gamma_1 ([\text{Au}(\text{CN})_2]_1 - [\text{Au}(\text{CN})_2]_2)$$

Изменение количества $\text{Ag}(\text{CN})_2$ в 1-й зоне:

$$\frac{dG_1^{\text{Ag}(\text{CN})_2}}{dt} = \chi_{[\text{Ag}(\text{CN})_2]}^{\text{Ag}} g_{\text{Ag}}^* - \beta_1 F \gamma_1 ([\text{Ag}(\text{CN})_2]_1 - [\text{Ag}(\text{CN})_2]_2)$$

Изменение количества тепла в первой зоне:

$$\frac{dQ_1}{dt} = \beta_1 F \gamma_2 C_2 (T_2 - T_1) - \beta_1 F \gamma_1 C_1 (T_1 - T_2) + \Delta H_1 g_{\text{Au}}^* + \Delta H_2 g_{\text{Ag}}^*$$

где $\Delta H_1, \Delta H_2$ — тепло, выделяющееся в реакциях (1) и (2), Дж/кг; T_1, T_2 — температуры зон, °C; C_1, C_2 — теплоемкости зон, Дж/(кг·°C).

Подмодель расчета изменений, происходящих во 2-й зоне.

Расчет количества исходных веществ.

Изменение количества Au:

$$\frac{dG_2^{\text{Au}}}{dt} = -\beta_1 F \gamma_2 ([\text{Au}]_2 - [\text{Au}]_1) + g_{\text{пит}}$$

$g_{\text{пит}}$ — подпитка концентратом, кг/с.

$$\frac{dG_2^{\text{Ag}}}{dt} = -\beta_1 F \gamma_2 ([\text{Ag}]_2 - [\text{Ag}]_1) + g_{\text{пит}}$$

Изменение количества CN^- :

$$\frac{dG_2^{\text{CN}^-}}{dt} = -\beta_1 F \gamma_2 ([\text{CN}^-]_2 - [\text{CN}^-]_1) + g_{\text{пит}}^{\text{CN}}$$

$g_{\text{пит}}^{\text{CN}}$ — подпитка цианидом, кг/с.

Изменение количества продуктов реакций.

Изменение количества $\text{Au}(\text{CN})_2$ во 2-й зоне:

$$\frac{dG_2^{\text{Au}(\text{CN})_2}}{dt} = \beta_1 F \gamma_1 ([\text{Au}(\text{CN})_2]_1 - [\text{Au}(\text{CN})_2]_2)$$

Изменение количества $\text{Ag}(\text{CN})_2$ во 2-й зоне:

$$\frac{dG_2^{\text{Ag}(\text{CN})_2}}{dt} = \beta_1 F \gamma_1 ([\text{Ag}(\text{CN})_2]_1 - [\text{Ag}(\text{CN})_2]_2)$$

Изменение количества тепла во 2-й зоне:

Численное решение системы дифференциальных уравнений методом Рунге–Кутты 4-го порядка предусматривает четырехкратное интегрирование уравнений. В общем случае уравнения модели в нелинейном виде представляются зависимостью вида:

$$\frac{dG_1^{Au(CN)_2}}{dt} = k_1 \cdot \exp\left(\frac{-E_1}{R\left(T_1 + \frac{1}{G_1 \cdot Q_1} \int \frac{dQ_1}{dt} d\tau\right)}\right) - \beta_1 F \begin{pmatrix} \gamma_{Au} [Au]_1 + \gamma_{Ag} [Ag]_1 + \gamma_{CN} [CN]_1 + \\ + \gamma_{O_2} [O_2]_1 + \gamma_{H_2O} [H_2O]_1 + \\ + \gamma_{Au(CN)_2} [Au(CN)_2]_1 + \\ + \gamma_{Ag(CN)_2} [Ag(CN)_2]_1 \end{pmatrix}$$

где, в свою очередь, концентрации веществ рассчитываются согласно формуле:

$$[Ag(CN)_2]_1 = \frac{1}{G_1} \int \frac{dG_1^{Ag(CN)_2}}{dt} d\tau.$$

При интегрировании нелинейных уравнений подобного типа численная процедура теряет устойчивость. Пакеты прикладных программ предусматривают создание двух подпрограмм функций. В первой подпрограмме реализуется численное интегрирование уравнений, во второй осуществляется аппроксимация нелинейностей на предыдущей итерации с передачей полученных значений в первую подпрограмму через общую область.

В данной работе, в связи с особенностями численного решения, дифференциальные уравнения представлены в линейной форме, а нелинейности правых частей выделены в отдельный блок.

Расчет нелинейностей дифференциальных уравнений.

Итеративный расчет концентраций:

$$[Au]_1(k) = [Au]_1(k-1) + \frac{1}{G_1} \int_{k-1}^k \frac{dG_1^{Au}}{dt} d\tau$$

$$[Ag]_1(k) = [Ag]_1(k-1) + \frac{1}{G_1} \int_{k-1}^k \frac{dG_1^{Ag}}{dt} d\tau$$

$$[CN]_1(k) = [CN]_1(k-1) + \frac{1}{G_1} \int_{k-1}^k \frac{dG_1^{CN}}{dt} d\tau$$

$$[O_2]_1(k) = [O_2]_1(k-1) + \frac{1}{G_1} \int_{k-1}^k \frac{dG_1^{O_2}}{dt} d\tau$$

$$[Au(CN)_2]_1(k) = [Au(CN)_2]_1(k-1) + \frac{1}{G_1} \int_{k-1}^k \frac{dG_1^{[Au(CN)_2]}}{dt} d\tau$$

$$\frac{dQ_2}{dt} = -\beta_1 F \gamma_2 C_2 (T_2 - T_1) + \beta_1 F \gamma_1 C_1 (T_2 - T_1).$$

$$[Ag(CN)_2]_1(k) = [Ag(CN)_2]_1(k-1) + \frac{1}{G_1} \int_{k-1}^k \frac{dG_1^{[Ag(CN)_2]}}{dt} d\tau$$

$$[H_2O]_1(k) = 1 - [Au]_1(k) - [Ag]_1(k) - [CN]_1(k) - [O_2]_1(k) - [Au(CN)_2]_1(k) - [Ag(CN)_2]_1(k)$$

Плотность первой зоны, $кг/м^3$:

$$\gamma_1 = \gamma_{Au} [Au]_1 + \gamma_{Ag} [Ag]_1 + \gamma_{CN} [CN]_1 + \gamma_{O_2} [O_2]_1 + \gamma_{H_2O} [H_2O]_1 + \gamma_{Au(CN)_2} [Au(CN)_2]_1 + \gamma_{Ag(CN)_2} [Ag(CN)_2]_1$$

где $\gamma_{Au} \dots \gamma_{Ag(CN)_2}$ — плотность компонентов, $кг/м^3$.

Вес первой зоны, $кг$:

$$G_1 = \gamma_1 \cdot V_1.$$

Теплоемкость первой зоны, $Дж/(кг \cdot ^\circ C)$:

$$C_1 = C_{Au} [Au]_1 + C_{Ag} [Ag]_1 + C_{CN} [CN]_1 + C_{O_2} [O_2]_1 + C_{H_2O} [H_2O]_1 + C_{Au(CN)_2} [Au(CN)_2]_1 + C_{Ag(CN)_2} [Ag(CN)_2]_1$$

где $C_{Au} \dots C_{Ag(CN)_2}$ — теплоемкости компонент, $Дж/(кг \cdot ^\circ C)$.

Температура первой зоны, $^\circ C$:

$$T_{1,k} = T_{1,k-1} + \frac{1}{G_1 Q_1} \int_{k-1}^k \frac{dQ_1}{dt} d\tau.$$

Количество ценных компонентов, прореагировавших по реакциям 1 и 2, находятся по следующим формулам:

$$g_{Au}^* = k_1 \cdot \exp\left(\frac{-E_1}{RT_1}\right),$$

$$g_{Ag}^* = k_2 \cdot \exp\left(\frac{-E_2}{RT_1}\right),$$

где k_1, k_2 — параметры, константы скорости реакции, $кг/с$; T — температура, $^\circ C$; E_1, E_2 — энергия активации в реакциях (1) и (2), $Дж/моль$; R — универсальная газовая постоянная, $Дж/моль \cdot ^\circ C$.

Итеративный расчет концентраций во 2-й зоне:

$$[Au]_2(k) = [Au]_2(k-1) + \frac{1}{G_2} \int_{k-1}^k \frac{dG_2^{Au}}{dt} d\tau$$

$$[Ag]_2(k) = [Ag]_2(k-1) + \frac{1}{G_2} \int_{k-1}^k \frac{dG_2^{Ag}}{dt} dt$$

$$[CN]_2(k) = [CN]_2(k-1) + \frac{1}{G_2} \int_{k-1}^k \frac{dG_2^{CN}}{dt} dt$$

$$[Au(CN)_2]_2(k) = [Au(CN)_2]_2(k-1) + \frac{1}{G_2} \int_{k-1}^k \frac{dG_2^{[Au(CN)_2]}}{dt} dt$$

$$[Ag(CN)_2]_2(k) = [Ag(CN)_2]_2(k-1) + \frac{1}{G_2} \int_{k-1}^k \frac{dG_2^{[Ag(CN)_2]}}{dt} dt$$

$$[H_2O]_2 = 1 - [Au]_2 - [CN]_2 - [Au(CN)_2]_2 - [Ag(CN)_2]_2 - [Ag]_2$$

Плотность 2-й зоны:

$$\begin{aligned} \gamma_2 = & \gamma_{Au} [Au]_2 + \gamma_{Ag} [Ag]_2 + \gamma_{CN} [CN]_2 + \\ & + \gamma_{Au(CN)_2} [Au(CN)_2]_2 + \gamma_{Ag(CN)_2} [Ag(CN)_2]_2 + \\ & + \gamma_{H_2O} [H_2O]_2 \end{aligned}$$

Вес 2-й зоны:

$$G_2 = \gamma_2 \cdot V_2$$

Теплоемкость 2-й зоны, Дж/(кг·°C):

$$\begin{aligned} C_2 = & C_{Au} [Au]_2 + C_{Ag} [Ag]_2 + C_{CN} [CN]_2 + \\ & + C_{H_2O} [H_2O]_2 + C_{Au(CN)_2} [Au(CN)_2]_2 + \\ & + C_{Ag(CN)_2} [Ag(CN)_2]_2 \end{aligned}$$

Температура 2-й зоны, °C:

$$T_{2,k} = T_{2,k-2} + \frac{1}{G_2 Q_2} \int_{k-1}^k \frac{dQ_2}{dt} dt$$

В реактор сырье поступает в виде частиц различного класса крупности. Допуская, что гранулы имеют сферическую форму, примем, что распределение радиусов частиц подчиняется биномиальному закону:

$$P(R=K) = \frac{C_{R-1}^{k-1}}{2^{R-1}},$$

где $k = 1, 2, \dots, R$ — радиусы частиц, мкм.

Тогда средний объем частиц пульпы (мкм³):

$$\begin{aligned} V_{cp} = & \frac{4}{3} \pi \sum_{k=1}^R \left(\frac{C_{R-1}^{k-1}}{2^{R-1}} \cdot k^3 \right) = \\ = & \frac{4}{3} \cdot \frac{\pi}{2^{R-1}} \sum_{k=1}^R \left(\frac{(R-1)!}{(k-1)!(R-k)!} \cdot k^3 \right) \end{aligned}$$

Средняя площадь поверхности частиц (мкм²):

$$\begin{aligned} S_{cp} = & 4\pi \sum_{k=1}^R \left(\frac{C_{R-1}^{k-1}}{2^{R-1}} \cdot k^2 \right) = \\ = & 4 \cdot \frac{\pi}{2^{R-1}} \sum_{k=1}^R \left(\frac{(R-1)!}{(k-1)!(R-k)!} \cdot k^2 \right) \end{aligned}$$

Среднее количество частиц, поступающих с пульпой:

$$N = \frac{V_{пит}}{V_{cp}}$$

Площадь контакта 1-й и 2-й зон (м²):

$$F = S_{cp} \cdot N,$$

где $V_{пит}$ — расход поступающей пульпы, м³/с; N — количество частиц.

Объем 2-й зоны (м³):

$$V_2 = V_{пит} \cdot t.$$

Тогда объем 1-й зоны (м³):

$$V_1 = V_{арр} - V_2,$$

где $V_{арр}$ — объем реактора (м³).

Предложенная динамическая модель позволяет оценивать текущие изменения концентрации цианида, золота, серебра и кислорода в процессе цианирования и, в соответствии с этим, дает возможность принимать решения по наиболее эффективному управлению кинетикой протекающих реакций.

Для принятия решений сформулирована следующая задача управления: *определить режимы подпитки реактора цианидом таким образом, чтобы количество золота и серебра, превращающихся в цианиды, было максимальным.*

Формально эта задача представлена в виде функционала цели:

$$I = F(Au, Ag, CN^-, Au(CN)_2^-, Ag(CN)_2^-) \rightarrow \max_{CN}$$

$$I = \int_{k-1}^k \frac{dG_1^{Au(CN)_2^-}}{dt} dt + \int_{k-1}^k \frac{dG_1^{Ag(CN)_2^-}}{dt} dt \rightarrow \max_{CN}$$

Решение этой задачи предусматривает определение значений количества CN^- , подаваемого в реактор таким образом, чтобы в режиме реального времени была обеспечена максимальная скорость реакций цианирования Au и Ag . Определение экстремальных значений функционала I осуществляется на каждом шаге итерации в рамках системы динамических ограничений, представленных дифференциальными уравнениями модели.

Разработана блок-схема функционирования системы управления пачуками для цианирования, в которых установлены гидроакустические излучатели, приведенная на рис. 3. В состав системы входят блок прогноза по математической модели и блок решения задачи оптимального управления (*).

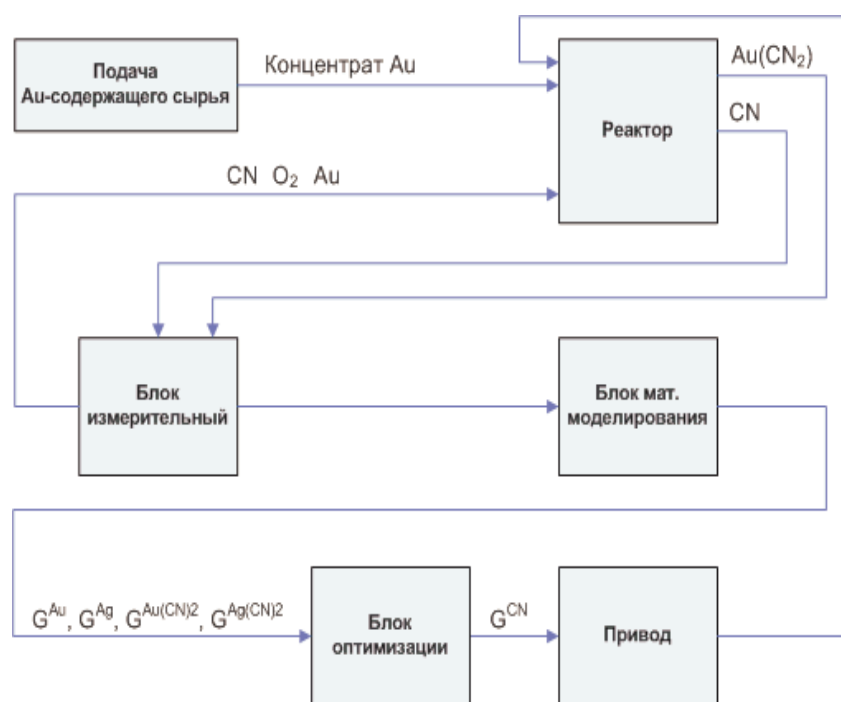


Рис. 3. Обобщенная блок-схема функционирования системы управления

Как следует из приведенной структуры, на основании данных измерений о текущем состоянии входных показателей установки в системе управления вырабатывается решение об изменении концентрации цианида и растворенного кислорода, подаваемых в пачуки. За счет этого повышается эффективность процесса цианирования и увеличивается производительность агрегатов. Предложенная математическая модель и алгоритм управления имеют универсальный характер и реализуются на каждом пачуке процесса цианирования представленной на схеме цепи аппаратов (рис. 1.) с соответствующей параметрической идентификацией модели. На основании предложенной структуры разработана блок-схема системы управления (рис. 4.).

Алгоритм системы управления работает следующим образом. Периодически (через 30 минут) таймер 2 включает мешалки 1, обеспечивая перемешивание золотосодержащего сырья. Одновременно включается насос для подачи пульпы через гидроакустические излучатели, что приводит к затягиванию кислорода, содержащегося в атмосферном воздухе, образуя реакционную зону 1.

Для прогноза кинетики протекающих реакций на вход блока 3, содержащего дифференциальные уравнения математической модели, подаются от блока измерений данные о концентрациях золота (периодически), циан-иона и кислорода — непрерывно.

Эти данные позволяют, используя метод Рунге–Кутты, осуществлять в блоке 4 процедуру численного прогноза по уравнениям модели (1 – 9) с аппроксимацией правых частей в блоке 5. В течение времени работы реактора в блоке 6 осуществляется

оперативный прогноз кинетики протекающих процессов.

В блоке 7 содержится функционал цели управления 11, согласно которому системе необходимо обеспечить режимы работы пачуков, в которых установлены гидроакустические излучатели, позволяющие растворять максимальное количество золота. В блоке 8 осуществляется поиск экстремальных значений функционала 11, при этом прогноз кинетики процесса по уравнениям математической модели (1 – 9) выполняет роль динамических ограничений. Решения экстремальной задачи 11 позволяют выработать управляющий сигнал, включающий в себя подпитку реактора свежей пульпой, цианидом, а также урегулирование концентрации кислорода воздуха. Выработанные в блоке 8 значения управляющих воздействий проходят усиление в блоке 9 и передаются на исполнительные механизмы (приводы), которые осуществляют соответствующие изменения, способствующие протеканию реакций (1) и (2).

Заключение

Таким образом, разработанная динамическая математическая модель позволяет в режиме реального времени рассчитывать количество растворяемого золота и серебра с соответствующим расходом цианида. На основании показателей, рассчитанных по модели, возможна реализация системы оптимального управления, которая обеспечивает:

- постоянную поддержку концентрации цианида и кислорода;
- подпитку пачуков свежей золотосодержащей пульпой;

– определение концентрации золота и серебра в выщелачиваемом растворе в ритме с процессом.

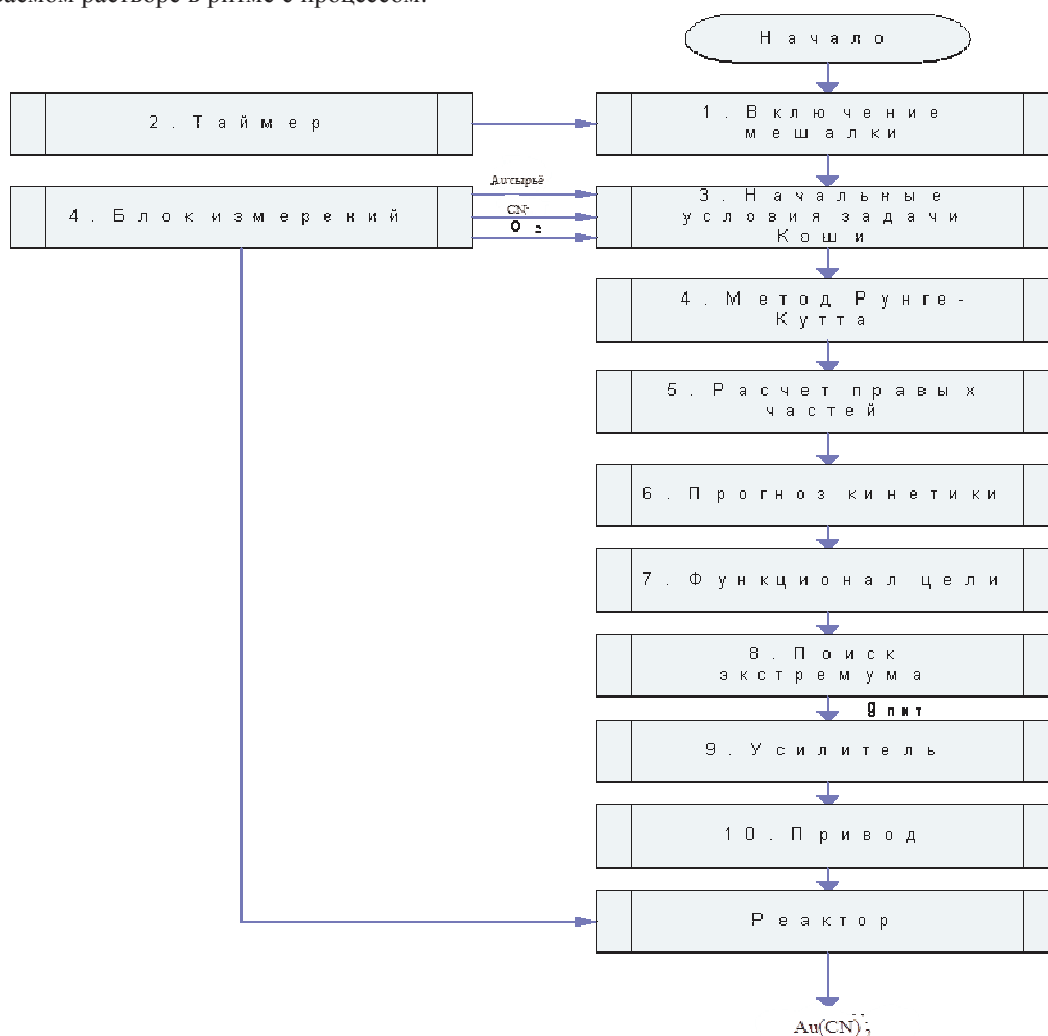


Рис. 4. Блок-схема алгоритма системы управления цианированием с применением гидроакустических излучателей

Реализация положений, изложенных в данной работе, позволяет достичь снижения потерь золота с хвостами и за счет постоянной подпитки раствора недостающими реагентами уменьшить продолжительность выщелачивания, что в конечном итоге обеспечивает увеличение производительности фабрики.

Литература

1. Чантурия В.А., Бунин И.Ж., Лунин В.Д., Седельникова Г.В., Крылова Г.С. Подземное и кучное выщелачивание урана, золота и других металлов: монография. М.: Издательский дом «Руда и металлы». 2005. Т. 2: Золото. С. 111-122.

2. Чантурия В.А., Бунин И.Ж. Высокоимпульсный метод дезинтеграции и вскрытия тонковкрапленных минеральных комплексов // Золотодобыча. 2006. № 87. С. 10-13.

3. Павлова Л.М., Бунин И.Ж. Вскрытие тонкодисперсных частиц золота комбинированием физических и биохимических методов // Материалы международного совещания «Плаксинские чтения». 2008. Т. 1. С. 69-72.

4. Кошель Е.А., Крылова Г.С., Елисеев В.Н., Ибрагимова Н.В., Жуйков Ю.Ф., Бурмистенко Ю.Н. Способ интенсификации выщелачивания золота: пат. 2245379 Рос. Федерация. Опубл. 27.01.2005.

5. Гурин К.К., Башлыкова Т.В., Ананьев П.П., Бобоев И.Р., Горбунов Е.П. Извлечение золота из хвостов золотоизвлекательной фабрики от переработки упорных руд смешанного типа // Цветные металлы. 2013. № 5. С. 36-38.

6. Стрижко Л.С., Бобоев И.Р., Гурин К.К. Способ извлечения золота из руд и концентратов: пат. 2522921 Рос. Федерация, № 2013111290/02; заявл. 14.03.13; опубл. 20.07.14, Бюл. № 20.

7. Стрижко Л.С., Бобоев И.Р., Гурин К.К., Рабиев Ф.Б. Разработка гидromеталлургической технологии переработки окисленных золотосодержащих руд Тарворского месторождения // Цветные металлы. 2013. № 4. С. 46-49.

8. Стрижко Л.С., Саруханов Р.Г., Бобоев И.Р. Способ повышения извлечения золота с применением гидроакустических излучателей // Современная наука: актуальные проблемы и пути их решения: материалы 3-й международной дистанционной научной конференции. Липецк (Россия). 5-6 сент. 2013г. Липецк, 2013. С. 6-8.

9. Стрижко Л.С., Бобоев И.Р., Шигин Е.С. Влияние акустического воздействия на процесс удаления примесей при извлечении золота // Цветные металлы. 2013. № 11. С. 58-61.

References

1. Chanturiya V.A., Bunin I.Zh., Lunin V.D., Sedel'nikova G.V., Krylova G.S. Underground and heap leaching of uranium,

gold and other metals: monografiya. M.: Izdatel'skii dom «Ruda i metally». 2005. T. 2: Zoloto. P. 111-122.

2. Chanturiya V.A., Bunin I.Zh. The highpulsed disintegration method of opening and thinly disseminated mineral complexes // Zolotodobycha. 2006. № 87. P. 10-13.

3. Pavlova L.M., Bunin I.Zh. Opening of fine disperse particles of gold by combining the physical and biochemical methods //Materialy mezhdunarodnogo soveshchaniya «Plaksinskie chteniya». 2008.T.1. P. 69-72.

4. Koshel' E.A., Krylova G.S., Eliseev V.N., Ibragimova N.V., Zhuikov Yu.F., Burmistenko Yu.N. Intensification of gold leaching method: pat. 2245379 Ros. Federatsiya. Opubl. 27.01.2005.

5. Gurin K.K., Bashlykova T.V., Anan'ev P.P., Boboev I.R., Gorbunov E.P. Recovery of gold from tailings of gold processing plant from processing refractory ores mixed type // Tsvetnye metally. 2013. № 5. P.36-38.

6. Strizhko L.S., Boboev I.R., Gurin K.K. A method of extracting gold from ores and concentrates: pat. 2522921 Ros. Federatsiya, № 2013111290/02; zayavl. 14.03.13; opubl. 20.07.14, Byul. № 20.

7. Strizhko L.S., Boboev I.R., Gurin K.K., Rabiev F.B. Development of hydrometallurgical technology for processing of oxidized gold ore of Tarrorskoe deposits // Tsvetnye metally. 2013. № 4. P. 46-49.

8. Strizhko L.S., Sarukhanov R.G., Boboev I.R. A method of increasing the extraction of gold using sonar emitters // Sovremennaya nauka: aktual'nye problemy i puti ikh resheniya: materialy 3-i mezhdunarodnoi distantsionnoi nauchnoi konferentsii. Lipetsk (Rossiya). 5-6 sent. 2013g. Lipetsk, 2013. P. 6-8.

9. Strizhko L.S., Boboev I.R., Shigin E.S. Influence of acoustic impact on the process of removing impurities in the recovery of gold // Tsvetnye metally. 2013. № 11. P. 58-61.

