

УДК 622.7; 622.772

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ СЕРЕБРА
ИЗ ХВОСТОВ ФЛОТАЦИОННОГО ОБОГАЩЕНИЯ
ОКИСЛЕННОЙ СВИНЦОВО-ЦИНКОВОЙ РУДЫ**

Ш. Хуссаини¹, А. М. Тита¹, С. Курсуноглу², Н. Курсуноглу², С. Топ³, М. Кая¹

¹Эскишехирский университет Османгази, 26480, г. Эскишехир, Турция

²Батманский университет,

E-mail: sait.kursunoglu@batman.edu.tr, 72100, г. Батман, Турция

³Университет Абдуллы Гюля, 38100, г. Кайсери, Турция

Рассмотрен метод выщелачивания серебра. Установлена высокая доля растворения серебра 89.7 % при концентрации тиосульфата аммония 30 г/л, концентрации сульфата меди 0.5 г/л, температуре выщелачивания 25 °С, продолжительности выщелачивания 4 ч. Построена модель прогнозирования условий растворения серебра на базе нечеткой логики. В качестве критериев выбраны: концентрация тиосульфата аммония, сульфата меди и продолжительность выщелачивания. Данная модель хорошо согласуется с экспериментальными данными. Полученные результаты позволяют применять моделирование на базе нечеткой логики для прогнозирования параметров выщелачивания серебра из хвостов обогащения.

Серебро, тиосульфат аммония, сульфат меди, прогнозирование с помощью нечеткой логики, хвосты флотационного обогащения

DOI: 10.15372/FTPRPI20230215

Серебро — ключевой компонент многих промышленных технологических процессов. Оно является сопутствующим продуктом при обогащении руд металлов, таких как медь, свинец и цинк. Благодаря высокой сопротивляемости кислотам, высокой температуре плавления, отличной электропроводности и высокой пластичности, серебро широко используется в электронной, электрической, аэрокосмической и других отраслях промышленности [1]. Согласно Геологической службе США, глобальное производство серебра будет ежегодно снижаться на 6 %. По данным на 2020 г. производство серебра составило 25 тыс. т. Объем добычи руды, содержащей серебро, из шахт Китая, Мексики и Перу значительно снизился в первой половине 2020 г. из-за остановок горного производства, вызванных пандемией COVID-19 [2], поэтому в последние годы извлечение серебра из вторичных источников вызвало повышенный интерес. Например, для переработки отходов электронной промышленности разработаны технологии химического извлечения серебра из сточных вод и вторсырья.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта Европейского союза “ERA-MIN2-Minteco” и Совета по научно-техническим исследованиям Турции (TUBITAK).

Серебро встречается как в золотых и серебряных рудах, так и в отработанных катализаторах, оптоволоконных кабелях и печатных платах [3–5]. Несмотря на представленный в научной литературе ряд методов выщелачивания серебра из руды и вторичных источников, наиболее эффективный — цианирование. Строгие экологические требования и нормы приводят к рассмотрению тиосульфата как возможного заменителя цианида в процессе выщелачивания благородных металлов [6–10]. Выщелачивание серебра в растворе тиосульфата эффективно из-за образуемых серебросодержащих веществ с сильной химической связью.

Большинство научных работ посвящено поиску альтернативных реагентов и технологий выщелачивания, включая получение сульфида серебра в растворе ферроцианида и в растворах $\text{FeCl}_3 - \text{HCl}$ и $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 - \text{H}_2\text{SO}_4$ [11–13]. Впервые тиосульфат был применен как альтернатива процессу цианирования в середине XIX в. чешским химиком-металлургом А. Патерой [14]. В настоящее время тиосульфат рассматривается как наиболее обоснованный заменитель цианидов из-за низкой стоимости и нетоксичности.

При рассеянном содержании серебра в руде происходит эффективное химическое связывание серебра и тиосульфата [15, 16]. Серебро и золото, как и другие базовые металлы, значительно зависят от наличия сульфидов. Выявлено, что сульфидные минералы и их концентраты в различной степени растворяются в среде тиосульфата аммония [17–21]. В [19] рассмотрено предварительное механохимическое обогащение и механическая активация серебра, золота и висмута из сульфидного концентрата. В [20] выполнена оптимизация селективного извлечения из сульфидных концентратов серебра. Термодинамическая оценка выщелачивающего раствора для определения его способности по извлечению серебра, свинца и золота проведена в [21]. Исследования показали возможность извлечения более чем 90 % серебра из руд и концентратов.

Экологические ограничения процесса цианирования и повышение цены на серебро способствовали значительному интересу к гидрометаллургическим методам обогащения серебросодержащих руд и вторичных источников. Повышение концентрации цианида приводит к увеличению растворимости серебра и ртути, однако влечет за собой экологические угрозы [22]. В [23] изучено извлечение серебра из сульфида серебра в виде синтетического порошка при отсутствии аммония с помощью тиосульфата и меди. Доля извлечения серебра составила 95.1 % при молярной концентрации тиосульфата в растворе 0.12 и наличии двухвалентной меди 0.05 моль/л.

Цель настоящей работы — изучение влияния концентрации тиосульфата аммония, концентрации сульфата меди, температуры выщелачивания и продолжительности выщелачивания на растворимость серебра из хвостов флотационного обогащения окисленной свинцово-цинковой руды. Проведено прогнозирование растворимости серебра на базе нечеткой логики. Данное исследование является продолжением работ [24, 25].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Образцы хвостов обогащения предоставлены компанией Orex Mining (г. Кайсери, Турция). После двухстадийного выщелачивания в серной кислоте и растворе гидроксида натрия и тартрата натрия–калия собран осадок для испытаний по выщелачиванию в растворе тиосульфата аммония и сульфата меди. В минералогической лаборатории (г. Измир, Турция) определен его элементарный состав с помощью масс-спектрометра с индукционной плазмой

(ICP-MS). Химический анализ показал наличие в осадке химических элементов в концентрациях частей на миллион (ч/млн): Ag 194, Cu 270, Cr 100, Pb 18 900, Zn 17 950, As 14 900, Ba 10 200. Содержание следующих металлов составило, %: Fe 29.20, Al 3.11, K 1.20, Ca 1.05, Na 0.98, Mg 0.41. Минералогический состав определялся методом рентгеновской дифракции на установке Bruker D8 Discover для углов $2\theta = 10 - 70^\circ$ при создаваемой радиации 40 мА и 45 кВ, которая регулировалась относительно кремния. Выявленные минералы оформлялись в виде базы данных ICDD PDF-2. Основные минералы в осадке, %: кварц (SiO_2) — 45.7, англезит (PbSO_4) — 15.9, коркит ($\text{PbFe}_3[(\text{PO}_4)(\text{SO}_4)(\text{OH}_6)]$) — 12.7, доломит ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) — 7.2, гетит ($\text{FeO}(\text{OH})$) — 9.5. В меньших долях содержались, %: кальцит (CaCO_3) — 4, смитсонит (ZnCO_3) — 3, церрусит (PbCO_3) — 2.

Выщелачивание проводилось в колбе объемом 100 мл, оснащенной нагревателем с регулируемой температурой и магнитным миксером MTOPS. С помощью Nach 40D измерялось pH раствора. Колба оборачивалась в алюминиевую фольгу для снижения потерь, связанных с испарением. В нее добавлялся тиосульфат аммония и сульфат меди в концентрациях, заранее определенных для каждого испытания. После нагрева раствора до требуемой температуры в него добавлялся образец для начала процесса выщелачивания. По его завершении магнитный миксер и датчики температуры отключались, колба охлаждалась. Фильтрация и промывка пульпы выполнялась деионизированной водой. Остаток просушивался в печи 24 ч при температуре 100°C , затем взвешивался и обрабатывался в царской водке. Для определения количества серебра в растворе использовался спектрофотометр атомной абсорбции AAS-PinAAcle 900F PerkinElmer. На основе содержания металлов в остатке выщелачивания рассчитывалась доля растворения серебра. В испытаниях применялись следующие чистые для анализа (ч. д. а.) реагенты: азотная кислота HNO_3 (производство компании Merck), соляная кислота HCl (Merck), тиосульфат аммония $\text{NH}_4\text{S}_2\text{O}_3$ (Acros Organic) и сульфат меди CuSO_4 (Detsan). Скорость перемешивания во всех испытаниях поддерживалась постоянной, равной 400 об./мин. Большая часть испытаний выполнялась дважды для подтверждения результатов.

ТЕОРИЯ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ

Нечеткая логика представляет собой методику решения задач, способную работать с лингвистическими и числовыми данными в режиме реального времени, упрощая управление сложными системами. По сравнению с традиционной логикой она позволяет использовать лингвистические фразы, например “правда / ложь”, “черное / белое”, “вкл. / выкл.” и т. д. В контексте традиционной логики состояние объекта описывается нулем или единицей, в контексте нечеткой логики — любым фактическим значением, лежащим в диапазоне 0–1. Структура системы нечеткой логики представлена в [26]. Рассмотрим основные этапы построения такой системы.

1. Определение входных и выходных нечетких лингвистических параметров. Первая стадия разработки модели нечеткой логики заключается в выборе подходящих входных параметров. Ключевые свойства данных параметров — способность представить рассматриваемую систему в обобщенном виде.

2. Фаззификация использует функции принадлежности для установления соответствия между четкими входными параметрами и степенями принадлежности нечеткому множеству [27]. Функции принадлежности должны охватывать совокупность понятийного аппарата и обладать способностью представлять лингвистическую переменную и нечеткое множество.

Наиболее часто используются трапецевидная, треугольная и гауссова функции принадлежности. Треугольные и трапецевидные функции наиболее распространены благодаря простоте представления рассматриваемой системы и малому объему вычислений [26]. Треугольная функция принадлежности определяется тремя параметрами (a_1, a_2, a_3):

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0, & x < a_1, \\ \frac{x - a_1}{a_2 - a_1}, & a_1 \leq x \leq a_2, \\ \frac{a_3 - x}{a_3 - a_2}, & a_2 \leq x \leq a_3, \\ 0, & x > a_3. \end{cases}$$

На рис. 1 показана треугольная функция принадлежности в графическом виде [28].

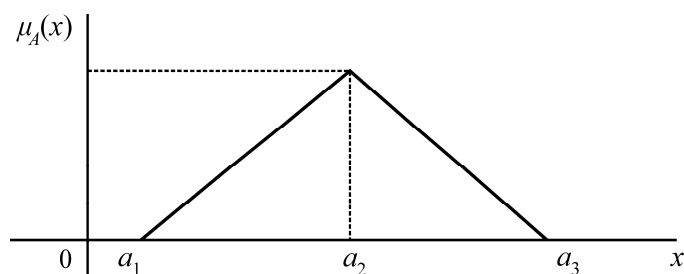


Рис. 1. Треугольная функция принадлежности

3. Установка базы нечетких правил, состоящей из утверждений “если – то” (“если” — антецедент (условие), “то” — консеквент (следствие)). Приведем базу нечетких правил:

если input 1 — MF1, input 2 — MF2 и/или..., то output — MF,

где input — входной параметр; output — выходной; MF — функция принадлежности.

4. Дефаззификация распределения значений выходного параметра — преобразование нечетких переменных в однозначные наборы данных. В реальных системах в качестве входных параметров выступают только однозначные (четкие) значения. Такое требование характерно для модели нечеткой логики Мамдани, которая используется для конструирования контроллера. В других системах нечеткого логического вывода: Ларсена, Тагаки–Сугено и Цукамото выходные параметры выявляются через специальную функцию, в результате получают более конкретные значения. Это иррационально, так как модель нечеткой логики должна обладать возможностью качественно распределять нечеткость от входных параметров к выходным. Описано множество методов дефаззификации, например метод центра площади, метод медианы площади, методы среднего максимума, наименьшего минимума и наибольшего максимума. Последние два метода нечеткого вывода редко используются из-за присущего им отклонения. Наиболее часто применяется метод центра площади.

На основе дисперсии значений выходного параметра и определения центра тяжести данной дисперсии формулируется однозначное целое число:

$$z = \frac{\sum_{j=1}^q z_j u_c(z_j)}{\sum_{j=1}^q u_c(z_j)},$$

где u_c — принадлежность к классу с при значении z_j ; z — центр массы [29].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Испытания выполнялись при концентрации тиосульфата аммония и тиосульфата натрия 20 г/л, сульфата меди 0.5 г/л и pH 10.5. Поддерживалась температура 25 °С. На рис. 2 представлены результаты выщелачивания при продолжительности 1–6 ч.

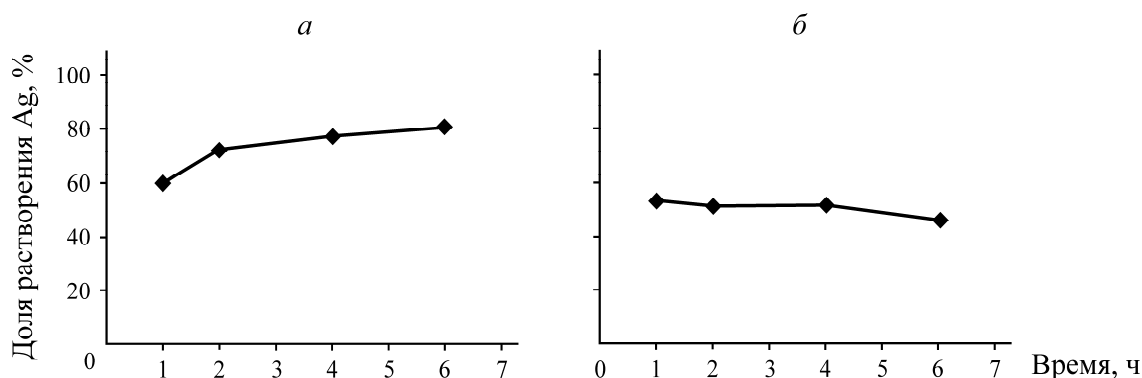
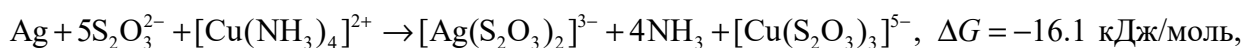
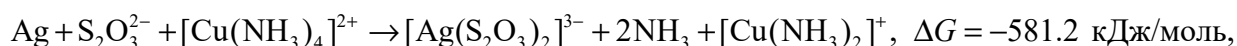


Рис. 2. Зависимость растворимости серебра от времени при концентрации тиосульфата аммония 20 г/л (а) и тиосульфата натрия 20 г/л (б)

В процессе выщелачивания в растворе тиосульфата аммония серебро и медь находились в форме аминовых и тиосульфатных комплексов. Согласно уравнениям



где ΔG — энергий Гиббса, комплекс тетраамина меди $[\text{Cu}(\text{NH}_3)_4]^{2+}$ выполняет функцию основного окислителя [17, 30].

При использовании тиосульфата аммония доля растворения серебра выросла с 59.8 до 77.0% при увеличении продолжительности выщелачивания с 1 до 4 ч (рис. 2а). Большая продолжительность выщелачивания способствует растворению серебра, меньшая — приводит к низким значениям доли растворения. Максимальная доля растворения серебра получается при продолжительности выщелачивания 4 ч и снижении соотношения твердого вещества к жидкости с 0.5:1 до 0.2:1 [31]. По сравнению с раствором тиосульфата аммония, доля растворения серебра в растворе тиосульфата натрия оставалась относительно постоянной на отметке 51% в течение 4 ч, затем при увеличении продолжительности выщелачивания до 6 ч — упала до 45.5% (рис. 2б). Вероятно, это произошло из-за низкой концентрации ионов водорода, которых оказалось недостаточно для формирования комплекса тиосульфата серебра. Таким образом, тиосульфат аммония более подходящий реагент выщелачивания, чем тиосульфат натрия.

Влияние концентрации тиосульфата аммония на растворимость серебра относительно продолжительности выщелачивания представлено на рис. 3 (соотношение жидкости к твердому веществу 10 : 1, температура 25 °С, концентрация сульфата меди 0.5 г/л, pH 10.5).

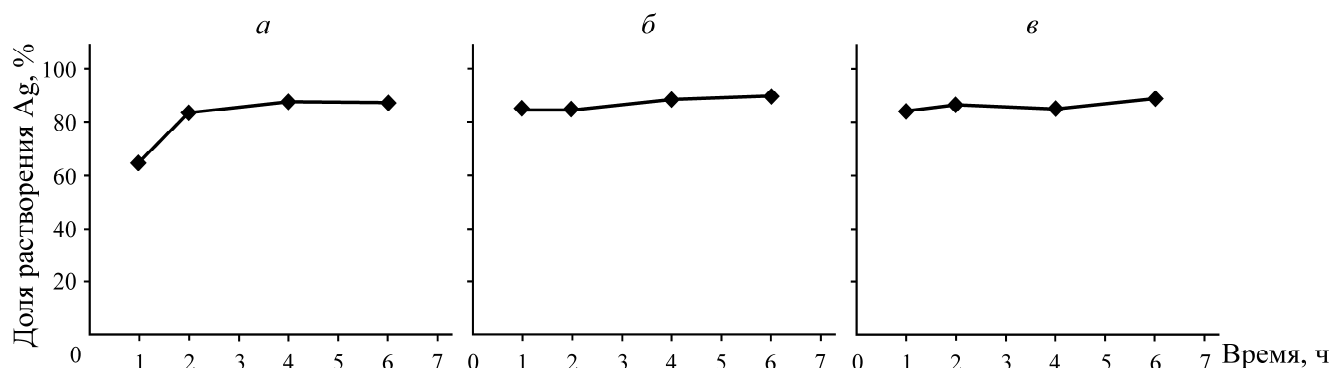


Рис. 3. Зависимость растворимости серебра от времени при различных концентрациях тиосульфата аммония: 30 г/л (а) 40 (б), 50 (в)

Доля растворения серебра увеличивается при повышении концентрации тиосульфата аммония, что согласуется с результатами работы [31]. При концентрации тиосульфата аммония 30 г/л доля растворения серебра повышалась на протяжении 4 ч, затем оставалась неизменной (рис. 3а). В частности, доля растворения серебра 87.6 % получена спустя 4 ч при концентрации тиосульфата аммония 30 г/л. При концентрациях тиосульфата аммония 40 и 50 г/л значительного влияния продолжительности выщелачивания на растворимость серебра не наблюдалось. После 1 ч выщелачивания доля растворения серебра практически не изменялась (рис. 3б, в). В [19] выявлено, что доля растворения серебра из концентратов сложных сульфидов без какой-либо механохимической подготовки составляет 52 % при продолжительности выщелачивания 1 ч, концентрации тиосульфата аммония 74 г/л, концентрации сульфата меди 10 г/л, температуре 70 °С и pH 5. Следовательно, концентрации тиосульфата аммония 30 г/л и продолжительности выщелачивания 4 ч достаточно для перехода более 85 % серебра в раствор. Тиосульфат аммония растворяет не более 90 % серебра. Это обусловлено тем, что некоторая доля серебра заключена в кварцевые кристаллические фазы.

На рис. 4 представлена растворимость серебра в зависимости от концентрации сульфата меди (соотношение жидкости к твердому веществу 10 : 1, температура 25 °С, продолжительность 4 ч, концентрация тиосульфата аммония 30 г/л, pH 10.5). Доля растворения серебра увеличилась с 82.5 до 87.6 % при повышении концентрации CuSO_4 с 0.25 до 0.50 г/л, затем интенсивность увеличения снизилась. Согласно [31], растворимость серебра из концентрированной сульфидной руды пропорциональна концентрации сульфата меди. При концентрации сульфата меди 1 г/л получена доля растворения серебра 90.6 %, при концентрации 0.75 г/л она составила 87.8 %. Выявлено, что изменение концентрации CuSO_4 меньше влияет на долю растворения серебра, чем изменение концентрации тиосульфата аммония. В данном исследовании принята концентрация сульфата меди 0.5 г/л как наиболее подходящая для выщелачивания серебра.

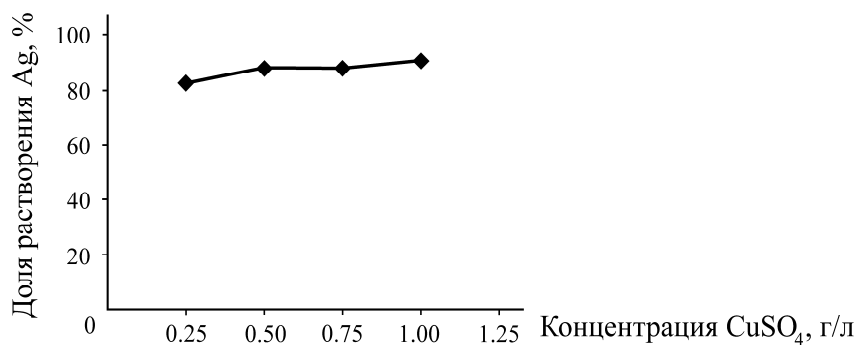


Рис. 4. Влияние концентрации сульфата меди на растворимость серебра

На рис. 5 показано влияние температуры на растворимость серебра в растворе тиосульфата. Продолжительность испытаний составила 4 ч, температура повышалась с 25 до 60 °С, соотношение жидкости к твердому веществу 10:1, pH 10.5, концентрации тиосульфата аммония 30 г/л, сульфата меди 0.5 г/л. Доля растворения серебра немного увеличилась при повышении температуры протекания реакции до 40 °С, затем оставалась постоянной. При 25 °С и продолжительности 4 ч доля растворения серебра составила 87.6%. В [32] обнаружено, что растворимость серебра уменьшается при повышении температуры с 20 до 70 °С в условиях концентрации тиосульфата натрия 75 г/л, продолжительности выщелачивания 2 ч и pH 5. На основе полученных результатов принято, что наиболее подходящая температура выщелачивания серебра — 25 °С.

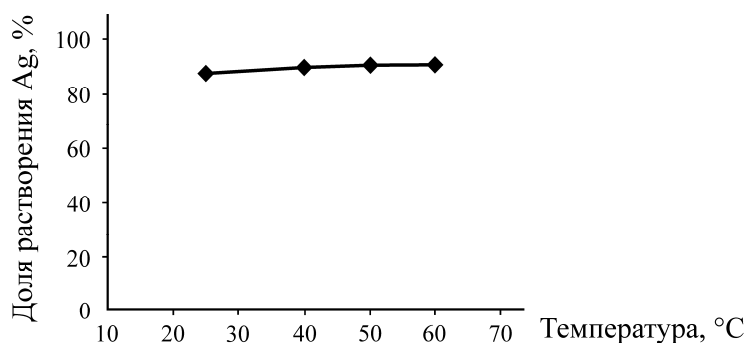


Рис. 5. Влияние температуры на растворимость серебра

Первый шаг разработки модели нечеткой логики заключался в определении функций принадлежности входных и выходных параметров. В табл. 1 представлено их лингвистическое выражение и функция принадлежности.

ТАБЛИЦА 1. Лингвистические выражения и параметры функции принадлежности модели нечеткой логики

Параметр	Описание	Параметры функции принадлежности	Лингвистическое выражение уровня
Входной	Продолжительность выщелачивания, ч	[1 2 4] [2 4 6]	Низкий Высокий
	Концентрация тиосульфата аммония, г/л	[20 30 40] [30 40 50]	Низкий Высокий
	Концентрация сульфата меди, г/л	[0.25 0.50 0.75] [0.50 0.75 1.00]	Низкий Высокий
Выходной	Доля растворения серебра, %	[65.0 82.5 87.6] [82.5 87.6 90.6]	Низкий Высокий

Исходя из результатов испытаний, выбраны следующие параметры модели нечеткой логики: треугольная функция принадлежности, система логического вывода Мамдани и метод дефаззификации — центр площади. На рис. 6 показана структурная схема модели нечеткой логики.

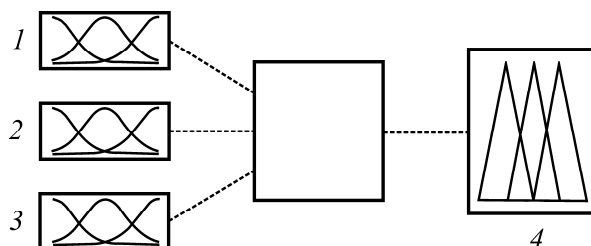


Рис. 6. Структурная схема модели нечеткой логики: 1 — продолжительность выщелачивания; 2 — концентрация тиосульфата аммония; 3 — концентрация сульфата меди; 4 — доля растворения серебра

На рис. 7 представлены функции принадлежности для входных и выходных параметров. Построенная модель нечеткой логики реализована в ПО MATLAB.

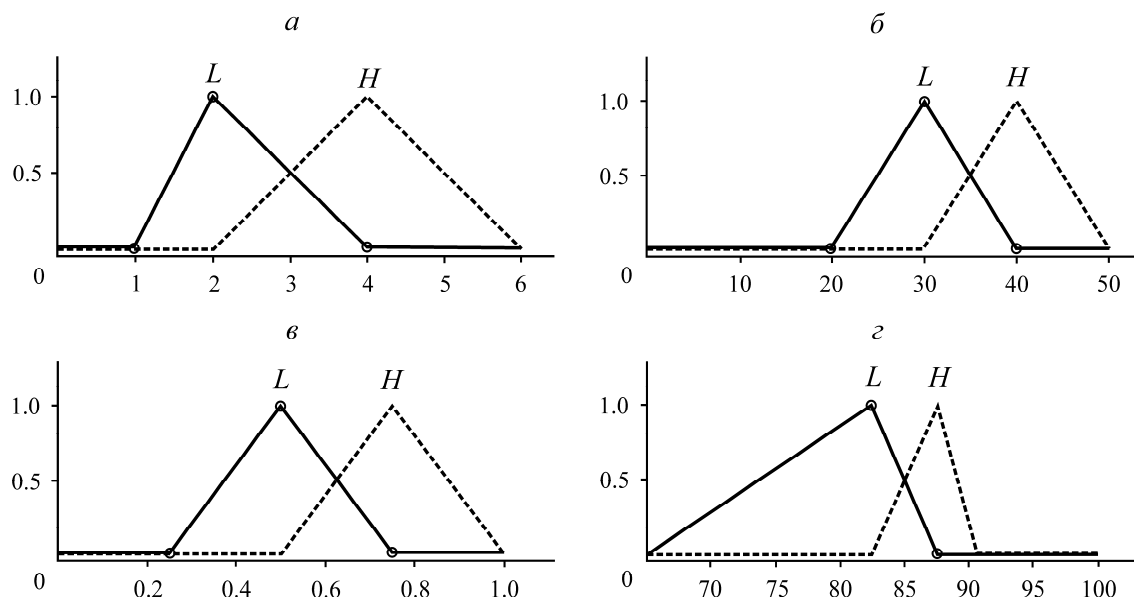


Рис. 7. Функции принадлежности: а — продолжительности выщелачивания; б — концентрации тиосульфата аммония; в — концентрации сульфата меди; г — доли растворения серебра (L — низкий уровень, H — высокий)

В качестве входных значений модели нечеткой логики использовались шесть лингвистических выражений (продолжительность выщелачивания, концентрация тиосульфата аммония и концентрация сульфата меди), обладающие двумя лингвистическими выражениями (низкий уровень и высокий). В результате сгенерировано восемь нечетких правил.

Реализация метода нечеткой логики для прогнозирования растворимости серебра состояла из четырех этапов. Сначала в модель вводились числовые значения входных параметров, затем они преобразовывались в нечеткие входные значения исходя из функций принадлежности (низкий уровень или высокий). Для анализа нечетких входных значений использовалась база нечетких правил. Заключительный этап — преобразование нечетких выходных значений

в одно выходное однозначное значение (доля растворения серебра). Для оценки эффективности предлагаемой модели нечеткой логики сравнивались полученные спрогнозированные и экспериментальные значения.

На рис. 8 представлены результаты моделирования нечеткой логикой, доля растворения серебра спрогнозирована при разных сочетаниях входных параметров (рис. 9).

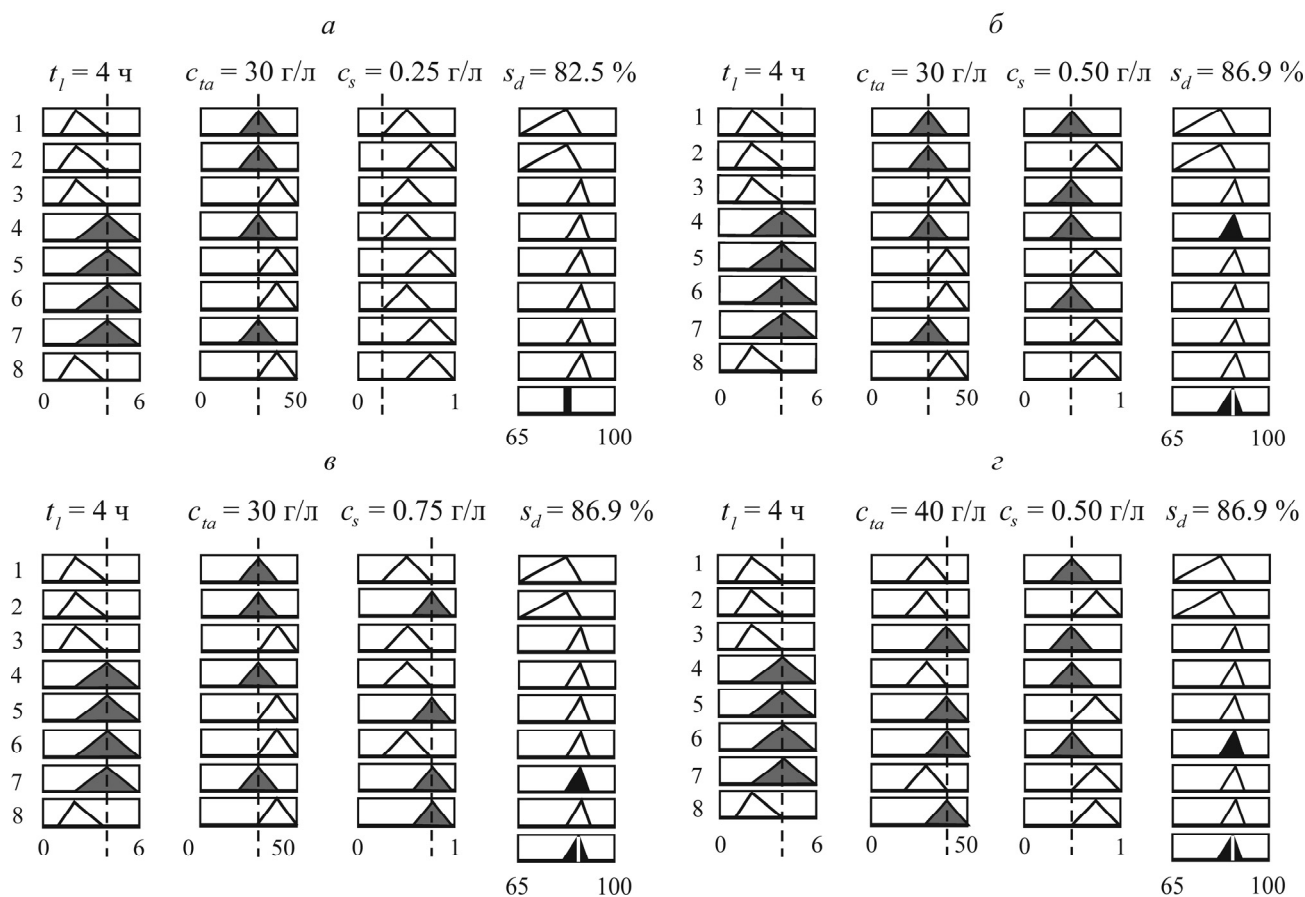


Рис. 8. Графическое представление нечетких результатов испытаний 1 (а), 2 (б), 3 (в), 4 (г): t_l — продолжительность выщелачивания; c_{ta} — концентрация тиосульфата аммония; c_s — концентрация сульфата меди; s_d — доля растворения серебра

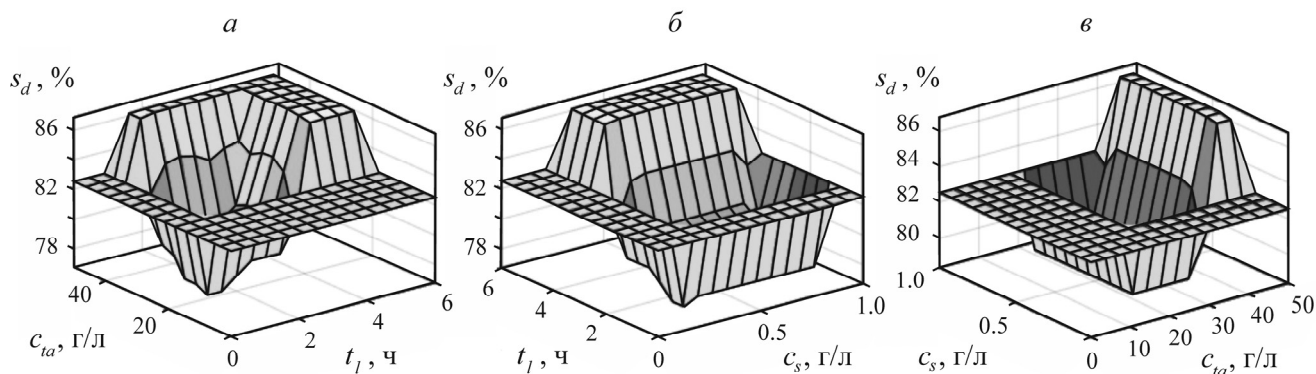


Рис. 9. Изменение входных параметров: а — концентрации тиосульфата аммония и продолжительности выщелачивания; б — продолжительности выщелачивания и концентрации сульфата меди; в — концентрации сульфата меди и концентрации тиосульфата аммония

В табл. 2 приведено сравнение некоторых спрогнозированных результатов с соответствующими экспериментальными при продолжительности выщелачивания 4 ч, которое показало их хорошее соответствие.

ТАБЛИЦА 2. Сравнение результатов моделирования и испытаний

Номер испытания	Входные параметры		Выходные параметры	
	Концентрация, г/л		Доля растворения серебра, %	Результат моделирования, %
	тиосульфата аммония	сульфата меди		
1	30	0.25	82.5	82.5
2	30	0.50	87.6	86.9
3	30	0.75	87.8	86.9
4	40	0.50	88.8	86.9

Таким образом, построенная модель на базе нечеткой логики способна обеспечить достоверную оценку растворимости серебра с коэффициентом корреляции 0.9657 (рис. 10).

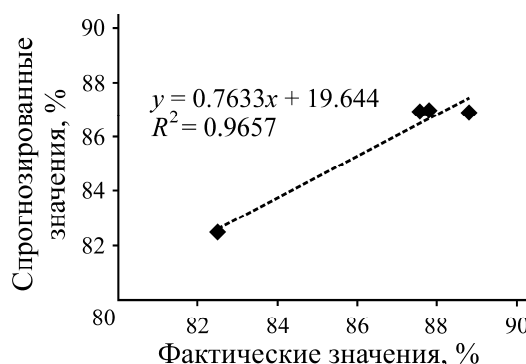


Рис. 10. Соотношение между спрогнозированными и фактическими значениями доли растворения серебра

ВЫВОДЫ

Рассмотрен гидрометаллургический метод выщелачивания серебра из хвостов обогащения окисленной свинцово-цинковой руды в растворе тиосульфата аммония и сульфата меди. Для подтверждения результатов испытаний выполнено прогнозирование на основе алгоритмов нечеткой логики в ПО MATLAB.

Получена относительная высокая доля растворения серебра (87.6 %) из хвостов обогащения в раствор тиосульфата аммония и сульфата меди при следующих параметрах: концентрация тиосульфата аммония 30 г/л, концентрация сульфата меди 0.5 г/л, температура выщелачивания 25 °С, продолжительность выщелачивания 4 ч. Определены наиболее значимые факторы, влияющие на растворение серебра, — концентрация тиосульфата аммония, концентрация сульфата меди и продолжительность выщелачивания.

Для прогнозирования растворимости серебра построена модель нечеткой логики, в которой наиболее значимые факторы выбраны входными параметрами. Спрогнозированные значения согласуются с экспериментальными с коэффициентом корреляции 0.9657, поэтому полученная модель может применяться для прогнозирования растворимости серебра из хвостов обогащения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Xiong Y., Li W., Jing X., Wang Y., Shan W., and Lou Z.** Selective recovery of Ag(I) coordination anion from simulate nickel electrolyte using corn stalk based adsorbent modified by ammonia–thiosemicarbazide, *J. Hazard. Mater.*, 2016, Vol. 301. — P. 277–285.
2. **Anderson S. C.** Mineral commodity summaries, U.S. Geological Survey, 2021. — P. 150–151.
3. **Xu B., Yang Y., Li Q., Jiang T., and Li G.** Stage leaching of a complex polymetallic sulfide concentrate: Focus on the extraction of Ag and Au, *Hydrometallurgy*, 2016, Vol. 159. — P. 87–94.
4. **Prado P. F. A. and Ruotolo L. A. M.** Silver recovery from simulated photographic baths by electrochemical deposition avoiding Ag₂S formation, *J. Environ. Chem. Eng.*, 2016, Vol. 4, No. 3. — P. 3283–3292.
5. **Mohammadi E., Pourabdoli M., Ghobeiti-Hasab M., and Heidarpour A.** Ammoniacal thiosulfate leaching of refractory oxide gold ore, *Int. J. Miner. Process*, 2017, Vol. 164. — P. 6–10.
6. **Breuer P. L. and Jeffrey M. I.** An electrochemical study of gold leaching in thiosulfate solutions containing copper and ammonia, *Hydrometallurgy*, 2002, Vol. 65, No. 2–3. — P. 145–157.
7. **Breuer P. L. and Jeffrey M. I.** Copper catalysed oxidation of thiosulfate by oxygen in gold leach solutions, *Miner. Eng.*, 2003, Vol. 16, No. 1. — P. 21–30.
8. **Rodriguez-Rodriguez C., Nava-Alonso F., and Uribe-Salas A.** Silver leaching from pyrrargyrite oxidation by ozone in acid media, *Hydrometallurgy*, 2014, Vol. 149. — P. 168–176.
9. **Xu B., Yang Y., Li Q., Li G., and Jiang T.** Fluidized roasting-stage leaching of a silver and gold bearing polymetallic sulfide concentrate, *Hydrometallurgy*, 2014, Vol. 147–148. — P. 79–82.
10. **Oraby E. A. and Eksteen J. J.** The leaching of gold, silver and their alloys in alkaline glycine–peroxide solutions and their adsorption on carbon, *Hydrometallurgy*, 2015, Vol. 152. — P. 199–203.
11. **Xie F., Dreisinger B. D., and Lu J. M.** The novel application of ferricyanide as an oxidant in the cyanidation of gold and silver, *Miner. Eng.*, 2008, Vol. 21, No. 15. — P. 1109–1114.
12. **Xie F. and Dreisinger B. D.** Leaching of silver sulfide with ferricyanide–cyanide solution, *Hydrometallurgy*, 2007, Vol. 88, No. 1–4. — P. 98–108.
13. **Dutrizac J. E.** The leaching of silver sulphide in ferric ion media, *Hydrometallurgy*, 1994, Vol. 35, No. 3. — P. 275–292.
14. **Flemming C. A.** Hydrometallurgy of precious metals recovery, *Hydrometallurgy*, 1992, Vol. 30, No. 1–3. — P. 127–162.
15. **Liu X., Xu B., Yang Y., Li Q., Jiang T., Zhang X., and Zhang Y.** Effect of galena on thiosulfate leaching of gold, *Hydrometallurgy*, 2017, Vol. 171. — P. 157–164.
16. **Jeffrey M. I.** Kinetic aspects of gold and silver leaching in ammonia–thiosulfate solutions, *Hydrometallurgy*, 2001, Vol. 60. — P. 7–16.
17. **Zipperian D., Raghavan S., and Wilson J. P.** Gold and silver extraction by ammoniacal thiosulfate leaching from a rhyolite ore, *Hydrometallurgy*, 1988, Vol. 19. — P. 361–375.
18. **Aylmore M. G.** Treatment of a refractory gold–copper sulfide concentrate by copper ammoniacal thiosulfate leaching, *Mineral. Eng.*, 2001, Vol. 14. — P. 615–637.
19. **Ficeriová J., Baláž P., and Villachica C. L.** Thiosulfate leaching of silver, gold and bismuth from a complex sulfide concentrates, *Hydrometallurgy*, 2005, Vol. 77. — P. 35–39.
20. **Ayata S. and Yildiran H.** Optimization of extraction of silver from silver sulphide concentrates by thiosulphate leaching, *Mineral. Eng.*, 2005, Vol. 18, No. 8. — P. 898–900.
21. **Alonso-Gomez A. R. and Lapidus G. T.** Inhibition of lead solubilization during the leaching of gold and silver in ammoniacal thiosulfate solutions (effect of phosphate addition), *Hydrometallurgy*, 2009, Vol. 99, No. 1–2. — P. 89–96.

22. **Deutsch J. L.** Fundamental aspects of thiosulfate leaching of silver sulfide in the presence of additives, University of British Columbia, Vancouver, 2012. — 126 p.
23. **Cui Y., Tong X., and Lopez-Valdivieso A.** Silver sulfide leaching with a copper–thiosulfate solution in the absence of ammonia, *Rare Metals*, 2011, Vol. 30. — P. 105–109.
24. **Kursunoglu S., Kursunoglu N., Hussaini S., and Kaya M.** Selection of acid type for the recovery of zinc from a flotation tailing using analytic hierarchy process, *J. Cleaner Production*, 2021, Vol. 283. — 124659.
25. **Hussaini S., Kursunoglu S., Top S., Ichlas Z. T., and Kaya M.** Testing of 17-different leaching agents for the recovery of zinc from a carbonate-type Pb–Zn ore flotation tailing, *Mineral. Eng.*, 2021, Vol. 168. — 106935.
26. **Zadeh L. A.** Fuzzy sets, *Inform. Control*, 1965, Vol. 8, No. 3. — P. 338–353.
27. **Shatnawi M., Shatnawi A., Alshara A., and Husari G.** Symptoms-based fuzzy-logic approach for COVID-19 diagnosis, *Int. J. Adv. Comp.r Sci. Appl.*, 2021, Vol. 12, No. 4. — P. 444–452.
28. **Yen J. and Langari R.** Fuzzy logic intelligence, control, and information, Prentice Hall, New Jersey, 1999. — 548 p.
29. **Ross T. J.** Fuzzy logic with engineering applications, John Wiley and Sons, UK, 2010. — 585 p.
30. **Aylmore M. G. and Muir D. M.** Thiosulfate leaching of gold — A review, *Miner. Eng.*, 2001, Vol. 14, No. 2. — P. 135–174.
31. **Bae M., Kim S., Sohn J., Yang D., and Lee H.** Leaching behaviour of gold and silver from concentrated sulfide ore using ammonium thiosulfate, *Metals*, 2020, Vol. 10, No. 8. — P. 1029.
32. **Li H., Li S., Srinivasakannan C., Zhang L., Yin S., Yang K., and Xie H.** Efficient cleaning extraction of silver from spent symbiosis lead–zinc mine assisted by ultrasound in sodium thiosulfate system, *Ultrason. Sonochem.*, 2018, Vol. 49. — P. 118–127.

Поступила в редакцию 28/I 2022

После доработки 18/II 2023

Принята к публикации 16/III 2023