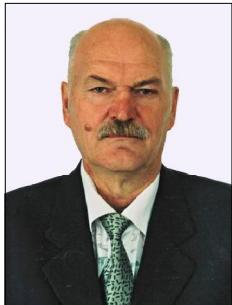


УДК. 669.3. 662.271/234/342/
DOI: 10.21209/2227-9245-2019-25-7-62-69

ОБОСНОВАНИЕ СКОРОСТНОГО РЕЖИМА РАСТВОРЕНИЯ МЕТАЛЛА В УСЛОВИЯХ СИСТЕМНОГО ПОДХОДА

SUBSTANTIATION OF THE SPEED MODE OF METAL DISSOLUTION IN THE CONDITIONS OF THE SYSTEM APPROACH



Ю. И. Рубцов, Забайкальский государственный университет, г. Чита
jri.rubtsow@yandex.ru

Yu. Rubtsov, Transbaikal State University, Chita

В цианидной добыче золота из минерального сырья разработка эффективной схемы напрямую связана с сокращением продолжительности производственных переделов. Материалы, опубликованные ранее по данной теме, не нашли своей реализации ни в учебных программах (которые почти ежегодно сокращаются), ни в проектных организациях. В связи с этим золотосодержащее минеральное сырьё в РФ используется крайне нерационально, в том числе, и из-за профессиональной неподготовленности специалистов. Возникла необходимость ещё раз изложить теоретические основы скоростного режима выщелачивания золота и других полублагородных металлов. На примере исследования реакций металлов с реагентами, включающих образование комплексных соединений и автокатализ, показана вероятность максимума скорости растворения. Экспериментальное изучение теоретических выводов в лабораторных условиях исследовано методом вращающегося диска на примере растворения меди, висмута и золота. Подтверждено теоретическое положение о максимуме скорости растворения металлов в изомольной системе. Использование основных положений о максимуме скорости растворения благородных и полублагородных металлов возможно и в производственных условиях, что позволяет изыскивать пути к повышению эффективности технологии. Так, в условиях полупромышленных испытаний выщелачивания золотосодержащего концентрата в цианидных накислороженных растворах на конусах Иргиредмет в артели Искра степень извлечения золота повышенена с 50 до 96 %. При полупромышленных испытаниях кучного выщелачивания золота пробы месторождения «Погромное» степень выщелачивания золота доведена до 82...84 % при сокращении цикла выщелачивания в 4 раза. Американские учёные начали признавать эффективность накислороживания цианидных растворов. Изложенные материалы актуальны и могут использоваться в учебном процессе, при планировании исследований в научных и проектных организациях

Ключевые слова: реагенты; скорость растворения металла; изомольная концентрация; максимум скорости; раствор цианида; выщелачивание золота; продолжительность выщелачивания; степень выщелачивания; накислороживание; эффективность

In cyanide gold mining, the development of an efficient scheme is directly linked to a reduction of production renovations duration. Previously published materials on this topic have not been implemented either in training programs (which are reduced almost every year), or in design organizations. In this regard, the use of gold-bearing mineral raw materials in the Russian Federation is extremely irrational, including the lack of specialists' training. There was a necessity once again to state theoretical bases of a high-speed mode of gold leaching and other semi-precious metals. The probability of dissolution maximum speed has been shown on the example of the reactions research of metals with reagents including formation of complex compounds and autocatalysis. The experimental research of theoretical conclusions in laboratory conditions has been studied by the rotating disc

method on the example of copper, bismuth and gold dissolution. The theoretical position on the maximum speed of metals' dissolution in the isomol system has been confirmed. The use of basic provisions on the maximum dissolution rate of precious and semi-precious metals is also possible under the industrial conditions, which allows to search for ways of improving the technology efficiency. So, the conditions of pilot plant testing of leaching the gold concentrate cyanide in air saturated solutions on the Irgiredmet cones in the joint adventure «Iskra» gold extraction rate has increased from 50-53 % to 94-96 %. In pilot scale trials of heap leaching of gold sample field «Pogrom» the degree of leaching of gold has increased to 82-84 % while the leach cycle has been reduced in 4 times. American scientists have already begun to recognize the effectiveness of cyanide solutions acidification. The materials presented in the article are relevant and can be used in the educational process, in the planning of scientific research and design organizations

Key words: reagents; metal dissolution rate; isomol concentration; maximum speed; gold leaching; reduction of leaching time; leaching duration; leaching degree; acidification; efficiency

Введение. Одной из причин, сдерживающих освоение небольших золоторудных месторождений, является недостаточность теоретических предпосылок, направленных на существенное сокращение продолжительности процесса. Недостаточная скорость процесса и невысокая степень извлечения золота при использовании цианидной технологии добычи привели к замене метода, имеющего существенную роль в развитии Забайкалья до 70-х гг. прошлого века, на флотационный. При этом золотодобывающим предприятиям отводилась незавидная доля на уровне поставщиков минерального сырья в виде золотосодержащих концентратов. Основную прибыль от реализации товарного золота получали металлургические предприятия Урала и европейской части России. Цианидная технология добычи золота в Забайкалье, как и во всей России, фактически исчезла. Небольшие перерабатывающие комплексы, имеющиеся в Балее, Ключах и других предприятиях служили испытательными полигонами для НИИ. В связи с тем, что в развитых странах основная доля добычи приходилась на технологии с использованием цианидов, а также в связи с истощением богатых золоторудных месторождений возникла необходимость в разработке совершенных цианидных технологий как для эффективной переработки золоторудных концентратов, так и для бедных окисленных и полуокисленных кварцитовых руд.

Объектом исследований являлись химически чистые висмут и медь в виде штабиков диаметром до 10 мм, золото в виде тонких пластинок, тонкой стружки или ватина, окисленная и полуокисленная руда, добытая из карьеров малых золоторудных месторождений с глубиной залегания 5...50 м.

Предметом исследований являлась скорость растворения золота в классических и накислороженных при атмосферных условиях цианидных растворах.

Цель исследования — увеличение скорости растворения и степени извлечения золота.

Для достижения цели в кинетических условиях растворения золота использовался метод вращающегося диска, в условиях диффузионного торможения исследования проводились методом «поршневого орошения» в перколяторах высотой 2...2,5 м цианидным и накислороженным цианидным раствором. Использовались пробирный, атомно-абсорбционный, химический, физико-химический, весовой и кинетический методы анализа.

Методология исследования основана на комплексном системном подходе к решению важной народно-хозяйственной проблемы и включает критический анализ литературных источников и совершенствование цианидной технологии извлечения золота путём накислороживания цианидных растворов.

По мнению Л. Мейтиса [3], коллективное взаимодействие компонентов при растворении металла более точно учитывается при системном подходе к изучению. При этом возможно выявить экстремальный характер зависимости скорости растворения металла от концентрации реагентов, например, в координатах «скорость растворения металла – изомольная концентрация реагентов», где скорость является функцией гетерогенной системы. Различные явления в растворах – химические взаимодействия, ассоциация, катализ, гидролиз, сорбция и другие, протекающие между реагентами, реагентами и растворителем, реагентами и продуктами

реакции, продуктами растворения и твёрдой фазой, – количественно влияют на значение скорости растворения металла. Если на графической зависимости скорости от состава реагентов наблюдается максимум, то он является следствием всех возможных взаимодействий между компонентами системы.

Рассмотрим несколько вариантов таких взаимодействий. Так, растворение серебра в растворе хлорного железа формально можно описать реакцией $FeCl_3 + Ag = AgCl + FeCl_2$. Согласно положению о формальной кинетике, уравнение скорости растворения серебра будет иметь вид

$$v = k \times C_{FeCl_3}. \quad (1)$$

При учёте катализа соляной кислотой в ассоциации с хлоридами железа (II и III) ограничиваемся комплексами с соотношением реагентов 1:1, определяемым отношением лиганда к реагенту, равным 1:1 и без учёта параллельных реакций для скорости растворения серебра получаем упрощённое кинетическое уравнение (2)

$$v = \frac{k \cdot C_{HCl} \cdot C_{FeCl_2}}{(1 + k^{**} \cdot C_{FeCl_2})} \cdot \frac{C^2_{FeCl_3}}{(1 + \chi \cdot C_{FeCl_3})}, \quad (2)$$

где k – константа скорости реакции,

k^{**} – константа нестойкости каталитического комплекса $H[FeCl_4]$,

χ – константа ассоциации комплекса $H[FeCl_4]$.

При анализе этого уравнения знаменатель первой дроби можно приравнять к 1, так как при селективном растворении ценных металлов из бедных руд концентрации C_{HCl} и C_{FeCl_3} обычно не превышают 0,1 моль/л. Эта величина в ходе реакции постоянна. Знаменатель второй дроби также является мало изменяющейся величиной. По этой причине уравнение (2) можно привести к более простому виду

$$v = k' C_{HCl} \cdot C_{FeCl_2} \cdot C^2_{FeCl_3}. \quad (3)$$

Если пренебречь явлением ассоциации хлорного железа с соляной кислотой, то уравнение (3) упростится до

$$v = k^* \cdot C_{HCl} \cdot C_{FeCl_2} \cdot C_{FeCl_3}. \quad (4)$$

При наличии в исходной реакционной смеси только хлорного железа и соляной кис-

лоты концентрация C_{FeCl_2} связана с исходной концентрацией хлорного железа простым соотношением: $C_{FeCl_2} = C^0_{FeCl_3} - C^*_{FeCl_3}$, или $C_{FeCl_2} = Const - C^*_{FeCl_3}$. Для малых концентраций хлорного железа ($C^*_{FeCl_3} >> 1$) величину $Const - C^*_{FeCl_3}$ можно принять как постоянную. С учётом последнего замечания формулы (3) и (4) примут вид

$$v = k'' C_{HCl} \cdot C^2_{FeCl_3} \text{ и} \quad (5)$$

$$v = k^{***} \cdot C_{HCl} \cdot C_{FeCl_3}. \quad (6)$$

При протекании процесса в кинетической области реакцию растворения металлов в соляной кислоте можно рассматривать как реакцию второго порядка по хлорному железу и первого порядка по соляной кислоте (5) (при учёте катализа в присутствии промотора и простой формы комплексообразования между реагентами) или как реакцию первого порядка по хлорному железу и первого порядка по соляной кислоте (6) (при учёте одного катализа).

После определения выражений для скорости растворения серебра для разных механизмов строят диаграмму с координатами «скорость реакции – изомольная концентрация реагентов». На рис. 1 представлены гипотетические кривые зависимости скорости растворения серебра (уравнения (5), (6) и (6а), когда $k = k'' = k^{**} = 1$) от состава исходных реагентов.

Выводом из характера кривых, приведённых на рис. 1, является то, что в системе $H_2O-HCl-FeCl_3-Me$ при коллективном учёте влияния компонентов наблюдаются максимумы скорости растворения серебра, смещённые по координате концентраций в сторону хлорного железа.

Механизм реакции, сопровождающейся катализом и ассоциациями между исходными реагентами, отличается от реакции, сопровождающейся только катализом, характеризуется большим смещением максимума скорости растворения металла в сторону одного из реагентов. Чем в больших физико-химических актах участвуют исходные реагенты, тем меньше величина скорости реакции.

Растворение золота в водном растворе цианида натрия представляется как реакция с окислителем (кислородом), которая сопровождается ассоциацией (образованием

комплексов $Au(CN)_2$). Этому случаю на диаграмме соответствует кривая 2 (рис. 1). Аналогичное заключение можно сделать о скорости растворения меди и висмута.

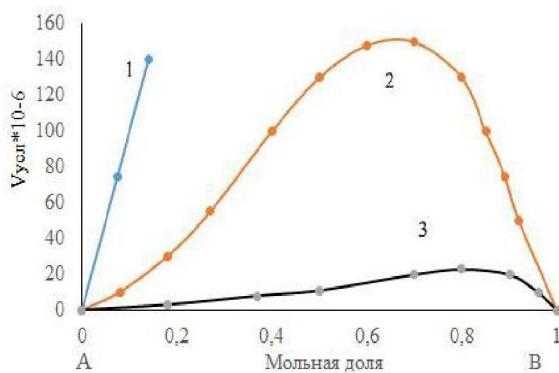


Рис. 1. Гипотетическая зависимость скорости растворения серебра в солянокислом растворе хлорного железа при общей концентрации реагентов в растворе 1 моль/л:

$$1) v = k \times C_{FeCl_3} \text{ (формальная кинетика);}$$

$$2) v = k \times C_{HCl} \times C_{FeCl_3} \text{ (ассоциация);}$$

$$3) v = k \times C_{HCl} \times C_{FeCl_3}^2 \text{ (ассоц., катализ).}$$

$$C_A = C_{HCl}; C_B = C_{FeCl_3}; (C_{HCl} + C_{FeCl_3}) = 0,1 /$$

Fig. 1. Hypothetical dependence of silver dissolution rate in chlorine iron dissolution at total concentration of reagents in 1 mol/l solution:

$$1) v = k C_{FeCl_3} \text{ (formal kinetics);}$$

$$2) v = k C_{HCl} C_{FeCl_3} \text{ (assemblage);}$$

$$3) v = k C_{HCl} C_{FeCl_3}^2 \text{ (assemblage, catalysis).}$$

$$C_A = C_{HCl}; C_B = C_{FeCl_3}; (C_{HCl} + C_{FeCl_3}) = 0,1$$

Теоретически показано, что в системе Me -реагенты- H_2O коллективные взаимодействия компонентов приводят к экстремальному изменению её свойства – скорости растворения металла. В связи с этим сформулирован принцип скоростного растворения (выщелачивания) металла: скорость растворения металла в изомольной смеси реагентов проходит через максимум. Принцип максимальной скорости растворения металла – это свойство гетерогенной химической системы.

Далее приводятся экспериментальные данные, подтверждающие изложенные теоретические представления. Опыты поставлены по методике вращающегося диска при скорости вращения порядка 200 об/мин, исключающей диффузионное торможение.

Площадь торца штабика из прутка металла поверхностью 1 cm^2 ($d = 1,14 \text{ см}$). В случае опытов с золотом поверхность вращающейся золотой пластиинки составила 1 cm^2 .

На рис. 2 представлены системы $Cu-FeCl_3-HCl-H_2O$ и $BiCl_3-FeCl_3-HCl-H_2O$. Общая концентрация соляной кислоты и хлорного железа в системе составляла 0,3 моль/л, температура – 60 °C, скорость вращения штабика меди – 200 об/мин.

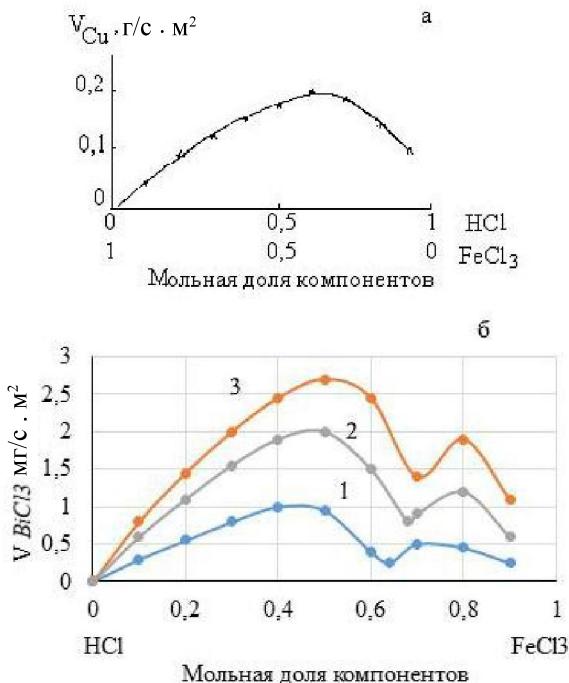


Рис. 2. Изменение скорости растворения металлов в системах $Cu-FeCl_3-HCl-H_2O$ (а) и $BiCl_3-FeCl_3-HCl-H_2O$ (б) (суммарная концентрация реагентов:

а) 0,1 моль/л; б) 1 – 0,15; 2 – 0,3; 3 – 0,6 моль/л

Fig. 2. Change of metal dissolution rate in the systems $Cu-FeCl_3-HCl-H_2O$ (a) and $BiCl_3-FeCl_3-HCl-H_2O$ (b) (total concentration of reagents: а) 0,1 mol/l;

б) 1 – 0,15; 2 – 0,3; 3 – 0,6 mol/l

Система $H_2O-NaCN-O_2-Au$. Опыты поставлены в цианидном растворе с изомольной концентрацией цианида и кислорода, равной 2,25; 4,0 и 6,0 ммоль/л. Данные по изменению скорости растворения золота представлены на рис. 3.

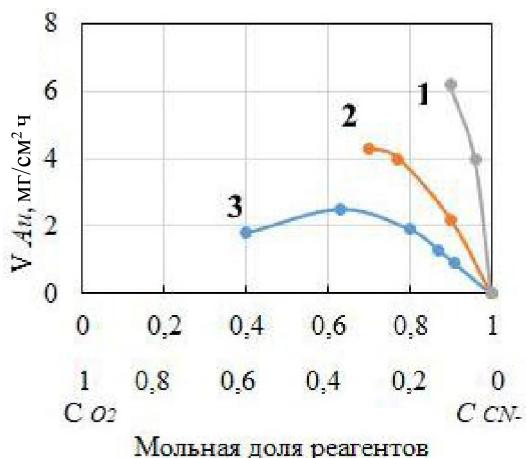


Рис. 3. Экспериментальные данные по растворению золота в системе $\text{Au}-\text{CN}-\text{O}_2-\text{H}_2\text{O}$:

- 1) $\text{CO}_2+\text{CN}^- = 6 \cdot 10^{-3}$ моль/л;
- 2) $\text{CO}_2+\text{CN}^- = 4,0 \cdot 10^{-3}$ моль/л;
- 3) $\text{CO}_2+\text{CN}^- = 2,25 \cdot 10^{-3}$ моль/л

Fig. 3. Experimental data on dissolution of gold in $\text{Au}-\text{CN}-\text{O}_2-\text{H}_2\text{O}$ system.
1) $\text{CO}_2+\text{CN}^- = 6 \cdot 10^{-3}$ mol/l;
2) $\text{CO}_2+\text{CN}^- = 4,0 \cdot 10^{-3}$ mol/l;
3) $\text{CO}_2+\text{CN}^- = 2,25 \cdot 10^{-3}$ mol/l

Теоретически предсказан и доказан принцип максимальной скорости растворения металла: скорость растворения металла (золота в том числе) в изомольной смеси реагентов проходит через максимум.

При атмосферном условии в системе $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCN}-\text{O}_2-\text{Au}$ увеличение концентрации кислорода ограничено его растворимостью в воде. При нормальных условиях на воздухе равновесная концентрация составляет порядка 8 мг/л. Если кислород вводить в замкнутую систему без контакта с атмосферой, например, в трубу или заполненный водным раствором реактор, то за короткое время – сотые доли секунды – возможно повысить концентрацию кислорода почти в 5 раз. Полярные молекулы воды практически мгновенно усваивают кислород до концентрации порядка 39...40 мг/л, то есть близкой к равновесной при контакте воды и кислорода. Через 1 сут при выстаивании на воздухе концентрация кислорода в воде снижается на 30...50 %.

Увеличение скорости выщелачивания рудного золота в реакторах или при перекопляции в чанах в присутствии кислорода подробно изучено И. Н. Плаксиным и его сотрудниками в середине XX в. Для выщелачивания упорного золота институтом Иргиредмет

разработан процесс автоклавного вскрытия сульфидного сырья при 10 кгс/см² в присутствии кислорода перед цианидным выщелачиванием. Ни исследователи Иргиредмет, ни другие учёные, в том числе И. Н. Плаксин, не рассматривали кинетику растворения металла в сложных системах на предмет возможного максимума скорости процесса [4; 6; 7].

В Забайкальском государственном университете (ЗабГУ) при изучении возможности эффективного извлечения золота, серебра, меди, висмута и других металлов всегда учитывалась вероятность повышения скорости растворения (выщелачивания) на основе принципа максимума скорости растворения металла в изомольной смеси реагентов. Так, для упорных руд с низким содержанием золота в ЗабГУ разработаны условия для скоростного цианидного выщелачивания из упорных золотосодержащих концентратов в присутствии кислорода (рис. 4). При этом степень извлечения золота была повышена с 49...53 до 94...96 %, а продолжительность выщелачивания сократилась с 36 до 22 и 6 ч соответственно.

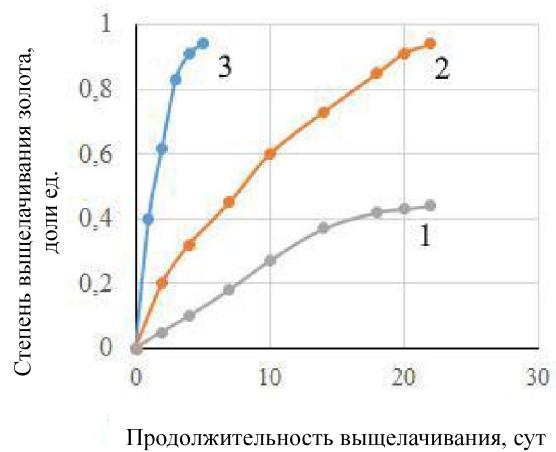


Рис. 4. Увеличение степени выщелачивания золота из золотосодержащего гравитационного концентрата при увеличении мольной доли кислорода: 1) при нормальных условиях на воздухе;

- 2) в атмосфере кислорода и давлении 1 кгс/см²;
- 3) в атмосфере кислорода и давлении 10 кгс/см² / Fig. 4. Increase in the degree of gold leaching from gold-containing gravitational concentrate with an increase in the molar fraction of oxygen: 1) under normal conditions in the air; 2) in the atmosphere of oxygen and pressure of 1 ATM; 3) in the atmosphere of oxygen and tacking 10 ATM

При классическом методе кучного выщелачивания золота концентрация кислорода далека от изомольной в системе $Au-CN-O_2-H_2O$. Так, при концентрации цианида в растворе 0,5 г/л (0,01786 моль/л) концентрация кислорода составляет 0,008 г/л (0,00025), или более чем в 70 раз меньше, чем это требуется в соответствии со стехиометрией. Накислороживание растворов до 38...40 мг/л при кучном выщелачивании снижает стехиометрическое несоответствие до 16. Следовательно, можно ожидать возрастание скорости перехода золота в раствор при кучном выщелачивании в 4 раза. При классическом кучном выщелачивании золота приемлемой считается продолжительность 60...90 сут. Использование принципа максимальной скорости растворения металла в изомольной системе теоретически позволяет снизить продолжительность кучного выщелачивания золота до 15...22 сут. При этом степень выщелачивания повысилась на 10...15 %, что значительно превышает затраты на транспортировку жидкого кислорода в специальных стальных танках и на устройство для дозирования газообразного кислорода в цианидный раствор.

При исследовании кучного выщелачивания золота из окисленных кварцевых руд месторождения «Погромное» факт сокращения продолжительности выщелачивания в 3...4 раза и увеличения степени извлечения золота на 10...15 % в присутствии кислорода неоднократно подтверждён как в лабораторных, так и в полупромышленных испытаниях на установках производительностью 6...12 т (рис. 5).

Тем не менее, результаты теоретических, экспериментальных, полупромышленных исследований по внедрению в практику накислороживания цианидных растворов при выщелачивании золота, основа которых разработана более 75 лет назад И. Н. Плаксиным, для кучного выщелачивания до сих пор серьёзно не рассматриваются ни при подготовке специалистов в горнометаллургических университетах страны (кроме ЗабГУ), ни при разработке эффективных способов выщелачивания золота из руд и промпродуктов в НИИ, ни при разработке проектов [1; 2; 5; 8–13]. В настоящее время золотодобыча в РФ связана с недополучением десятков тонн драгоценного металла. В связи с крайне

ограниченными сведениями в публикациях по эффективному цианидному выщелачиванию золота из упорных руд нами предпринимается попытка освежить в памяти специалистов российский научный опыт и побудить предпринимателей как к внедрению накислороживания цианидных растворов при выщелачивании золота, так и к финансированию научных коллективов, которые вносят существенный вклад в теоретическое и экспериментальное обоснование эффективных способов выщелачивания из упорных руд и промпродуктов.

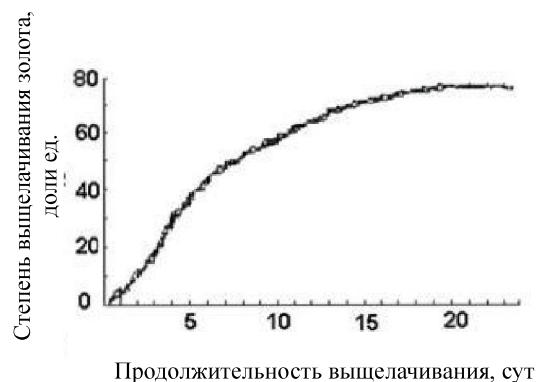


Рис. 5. Результаты полупромышленных испытаний по скоростному выщелачиванию золота из окисленной руды месторождения «Погромное» на пробе руды 6 т, дроблённой до крупности 10 мм в накислороженном цианидном растворе / Fig. 5. Results of semi-industrial tests on high-speed leaching of gold from the oxidized ore of the «Pogromnoe» deposit on a sample of ore 6 t, crushed to a size of 10 mm in acidified cyanide solution

Выводы. Анализ уравнений кинетики в системе жидкость–твёрдое, включающих формальное взаимодействие, ассоциацию и катализ, указал на наличие максимума скорости растворения металла в замкнутой изомольной системе H_2O –реагенты–Ме. Компенсировать снижение добычи золота в связи с повышенной упорностью добываемого золоторудного сырья возможно в случае внедрения разработанных в ЗабГУ методов скоростного кучного выщелачивания: использования принципа максимума скорости растворения металла, накислороживания и активации растворов.

Список литературы

1. Дементьев В. Е., Дружина Г. Я., Гудков С. С. Кучное выщелачивание золота и серебра. Иркутск: Иргиредмет, 2004. 352 с.
2. Макаров А. А., Салов В. М. Алгоритм управления аммиачно-цианистым процессом переработки медистых золотосодержащих руд // Вестник Иркутского национального исследовательского технического университета. 2013. № 8. С. 149–153.
3. Мейтис Л. Введение в курс химического равновесия и кинетики. М.: Мир, 1984. 480 с.
4. Меретуков М. А. Золото: химия, минерология, metallurgiya. М.: Руда и металлы, 2008. 527 с.
5. Минаев Г. Г., Леонов С. Б. Кучное выщелачивание золотосодержащих руд. Иркутск: ИрГТУ, 1997. 99 с.
6. Плаксин И. Н. Гидрометаллургия. М.: Наука, 1972. 278 с.
7. Реутов Д. С., Халезов Б. Д., Овчинникова Л. А., Гаврилов А. С. Изучение кинетики растворения феррита цинка методом врачающегося диска // Цветные металлы. 2017. № 11. С. 12–15.
8. Строганов Г. А., Дементьев В. Е., Шутов А. М., Татаринов А. П. Технология кучного выщелачивания благородных металлов // Горный журнал. 1994. № 2. С 11–12.
9. Чурсанов Ю. В., Луцик В. И., Старовойтов А. В., Поташников Ю. М. Кинетика окислительного растворения золота в смеси тиоцианата и тиомочевины // Вестник Тверского государственного университета. Серия «Химия». 2015. № 2. С. 52–60.
10. Kelli K. K. Contribution to the data on theoretical metallurgy: part 13. High-temperature heat-content, heat-capacity and entropy data for elements and inorganic compounds // U. S. Department of the Interior; Bureau of Mines. Washington: GPO, 1960. 280 p.
11. Kubaschewski O., Evans E. L. Metallurgical thermochemistry: 3rd ed. Oxford: Pergamon, 1958. P. 32–35.
12. Samikhov Sh. R., Zinchenko Z. A., Shermatov N. The study and development of the mathematical models of poor gold-containing ores the process heap (the dump) leaching // The XVI Balkan Congress on mineral processing. Belgrade, 2015. Vol. 2 P. 709 – 712.
13. Yusupxodjayev A. A., Xudoyarov S. R. Metallurgiyada ishlab chiqarish texnologiyasi. Toshkent: ToshDTU, 2016. 57 p.

References

1. Dementiev V. Ye., Druzhina G. Ya., Gudkov S. S. *Kuchnoe vyshchelachivanie zolota i serebra* (Heap leaching of gold and silver). Irkutsk: Irgiredmet, 2004. 352 p.
2. Makarov A. A., Salov V. M. *Vestnik Irkutskogo natsionalnogo issledovatel'skogo tehnicheskogo universiteta* (Bulletin of the Irkutsk National Research Technical University), 2013, no. 8, pp. 149–153.
3. Matis L. *Vvedenie v kurs himicheskogo ravnovesiya i kinetiki* (Introduction to the course of chemical equilibrium and kinetics). Moscow: Mir, 1984. 480 p.
4. Meretukov M. A. *Zoloto: himiya, mineralogiya, metallurgiya* (Gold: chemistry, mineralogy, metallurgy). Moscow: Ore and Metals, 2008. 572 p.
5. Mineev G. G., Leonov S. B. *Kuchnoe vyshchelachivanie zolotosoderzhashchih rud* (Heap leaching of gold-bearing ores). Irkutsk: Irkutsk State University, 1997. 99 p.
6. Plaksin I. N. *Gidrometallurgiya* (Hydrometallurgy). Moscow: Nauka, 1972. 278 p.
7. Reutov D. S., Khalezov B. D., Ovchinnikova L. A., Gavrilov A. S. *Tsvetnye metally* (Non-ferrous metals), 2017, no. 11, pp. 12–15.
8. Stroganov G. A., Dementiev B. E., Shutov A. M., Tatarinov A. P. *Gorny zhurnal* (Mining Journal), 1994, no. 2, pp. 11–12.
9. Chursanov Yu. V., Lutsik V. I., Starovoitov A. V., Potashnikov Yu. M. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya "Himiya"* (Bulletin of Tver State University. Series “Chemistry”), 2015, no. 2, pp. 52–60.
10. Kelli K. K. *U. S. Department of the Interior; Bureau of Mines* (U. S. Department of the Interior; Bureau of Mines). Washington: GPO, 1960, 280 p.
11. Kubaschewski O., Evans E. L. *Metallurgical thermochemistry: 3rd ed.* (Metallurgical thermochemistry: 3rd ed.). Oxford: Pergamon, 1958, pp. 32–35.
12. Samikhov Sh. R., Zinchenko Z. A., Shermatov N. *The XVI Balkan Congress on mineral processing* (The XVI Balkan Congress on mineral processing). Belgrade. 2015, vol. 2, pp. 709–712.
13. Yusupxodjayev A. A., Xudoyarov S. R. *Metallurgiyada ishlab chiqarish texnologiyasi* (Metallurgiyada ishlab chiqarish texnologiyasi). Toshkent: ToshDTU, 2016. 57 p.

Коротко об авторе _____ **Briefly about the author**

Рубцов Юрий Иванович, д-р техн. наук, профессор кафедры безопасности жизнедеятельности, Забайкальский государственный университет, г. Чита, Россия. Область научных интересов: физико-химическая геотехнология
jri.rubtsow@yandex.ru

Yuriy Rubtsov, doctor of engineering sciences, professor, Transbaikal State University, Chita, Russia. Sphere of scientific interests: physical and chemical geotechnologies

Образец цитирования _____

Рубцов Ю. И. *Обоснование скоростного режима растворения металла в условиях системного подхода* // *Вестник Забайкальского государственного университета*. 2019. Т. 25. № 7. С. 62–69. DOI: 10.21209/2227-9245-2019-25-7-62-69.

Rubtsov Yu. Substantiation of the speed mode of metal dissolution in the conditions of the system approach // *Transbaikal State University Journal*, 2019, vol. 25, no. 7, pp. 62–69. DOI: 10.21209/2227-9245-2019-25-7-62-69.

Статья поступила в редакцию: 09.09.2019 г.

Статья принята к публикации: 18.09.2019 г.