

ТЕХНОЛОГИЯ НЕОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ

DOI: 10.26730/1999-4125-2021-2-29-34

УДК 66.011

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ТИОСУЛЬФАТНО-АММИАЧНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ ЗОЛОТА ИЗ ЗОЛОТОСОДЕРЖАЩИХ РУД МЕСТОРОЖДЕНИЯ «ИСТИКЛОЛ» (ТУТЛИ)

MATHEMATICAL DESCRIPTION OF THIOSULPHATE-AMMONIA LEACHING OF GOLD FROM GOLD-CONTAINING ORE OF "TUTLI" DEPOSIT (ISTIKLOL)

Холов Холмахмад Исроилович¹
канд. техн. наук, старший научный сотрудник, e-mail: Kholmahmad90@mail.ru
Kholmahmad I. Kholov, C. Sc. in Engineering, Senior Researcher,
Шарифбоев Насим Тухтабоевич²
аспирант, nasim_3535@mail.ru
Nasim T. Sharifboev, postgraduate,
Самихов Шонавруз Рахимович¹
доктор техн. наук, ведущий научный сотрудник, e-mail: samikhov72@mail.ru
Shonavruz R. Rahimovich, Dr. Sc. in Engineering, Leading Researcher,
Зарифова Махдужба Салохиддинова¹
магистр, zarifova.m@mail.ru
Mahjuba S. Zarifova, master degree,
Шерматов Нурмахмад³
доктор техн. наук, профессор, e-mail: n.shermatov@mail.ru
Nurmahmad Shermatov, Dr. Sc. in Engineering, Professor,

¹Институт химии имени В.И. Никитина НАН Таджикистана, Республика Таджикистан, 734063, г.Душанбе, ул. Айни 299/2,

¹V.I. Nikitin Institute of Chemistry, Academy of sciences of the Republic of Tajikistan, Republic of Tajikistan, 734063, Dushanbe, st. Ayni 299/2,

²Горно-металлургический институт Таджикистана, Республика Таджикистан, г.Бустон, ул. Московская 6,

²Mining-Metallurgical Institute of Tajikistan, Republic of Tajikistan, c. Buston, st. Moskovskaya 6,

³Таджикский национальный университет, Республика Таджикистан, 734025, г.Душанбе, пр.Рудаки, 17,

³Tajik National University, Republic of Tajikistan, 734025, Dushanbe, st. Rudaki 17,

Аннотация:

В статье обобщены результаты экспериментальных и теоретических исследований по изучению тиосульфатно-аммиачного выщелачивания золота из пробы руды Тутлинского месторождения с добавками тиосульфата натрия, сульфита натрия, сульфата натрия, сульфата аммония и др. Для достижения максимального извлечения золота предложена степень растворения золота при pH 10...11, в присутствии воздуха и отсутствии восстановителя при 60°C. При этом общее извлечение металлов составляет: золото – 80,0% и серебро – 25,3%. Изложены некоторые новые общие идеи, демонстрируемые на практических примерах, доведенных до чисел.

Общезвестно, что основой всего естествознания являются наблюдения и эксперименты, которые дают числовые результаты. Обработка этих чисел приводит к осмыслению результатов наблюдений и экспериментов, позволяющих делать соответствующие выводы, но при построении теории явления и вычислении величин, которые не наблюдались, а выводились путем обработки результатов эксперимента, приходится пользоваться математическими методами, в частности, различными

эмпирическими зависимостями.

В статье использован универсальный метод наименьших квадратов для определения неизвестных параметров в уравнениях множественной регрессии.

Статья может быть полезной для научных работников и инженеров, занимающихся применением математических методов в гидрометаллургии.

Ключевые слова: тиосульфатное выщелачивание, золото, регрессия, метод наименьших квадратов, стандартная программа, система.

Abstract:

The article summarizes the results of experimental and theoretical studies of thiosulfate-ammonia leaching of gold from an ore sample of the Tutli deposit with additives - sodium thiosulfate, sodium sulfite, sodium sulfate, ammonium sulfate, etc. To achieve the maximum gold recovery, the degree of gold dissolution at pH 10 ... 11, in the presence of air and in the absence of a reducing agent at 60 °C, has been proposed. In this case, the total extraction of metals is: gold – 80,0 % and silver – 25,3 %. Some new general ideas are outlined and demonstrated with practical examples brought to numbers.

It is well known that the basis of natural sciences is observation and experiments, which give numerical results. The processing of these numbers leads to comprehension of the results of observations and experiments, which allows one to draw appropriate conclusions. But when constructing a theory of the phenomenon and calculating quantities that were not observed but derived by processing the experimental results, one has to use mathematical methods, in particular, various empirical dependencies.

The article uses a universal least squares method to determine unknown parameters in multiple regression equations.

The article can be useful for scientists and engineers involved in the application of mathematical methods in hydrometallurgy.

Key words: thiosulfate leaching, gold, regression, least squares method, standard program, system.

Введение

Наряду с традиционными химическими и физическими методами анализа гидрометаллургических процессов широко применяется метод математического моделирования, открывающий большие возможности для интерпретации экспериментальных данных, выявления количественных закономерностей и выдвижения новых гипотез о механизме процессов. Сущность математизации состоит в определении отношения или структуры явления без учета специфической природы его элементов, в фиксировании главных логических зависимостей [1, с. 3; 2, с. 256; 3].

Основной задачей при построении модели является цель. Так, для предприятия строятся модели производства, снабжения, связи, экономики и др. [4, с.801]. Может существовать также множество моделей отдельного объекта: функционирования, материального баланса, точности и т.п. [5, с.1 23; 6, с. 205].

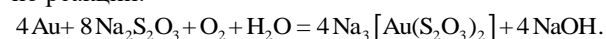
Математические модели применяются для предсказания режимов, выбора некоторых определенных (например, оптимальных) условий функционирования объекта, выбора алгоритмов оптимального управления, проверки гипотез, масштабного перехода от результатов лабораторных исследований к промышленным условиям [7, с. 201; 8, с. 140].

К эффективным и недефицитным растворителям золота относятся растворы элементарной серы и ее соединений в водно-

щелочной и органической средах [9, с.58]. В частности, особый интерес представляют тиосульфат натрия, серощелочные растворы, а также органические сульфиды [10, с.121].

Способ выщелачивания золота растворами тиосульфата натрия в присутствии сульфит-иона и иона меди в щелочной среде является достаточно известным в мировой практике, о чем свидетельствуют публикации [11, с.75; 12, с.78].

Тиосульфатное выщелачивание золота проводится в присутствии кислорода и протекает по реакции:



Экспериментальная часть

В лабораторных условиях проводили тиосульфатно-аммиачное выщелачивание руды месторождения «Истиклол» в слабощелочных, слабокислых и умеренно-нейтральных средах в присутствии SO_4^{2-} – содержащих соли сульфата аммония (0,2 моль/л), сульфата натрия (10 г/л = 0,07 моль/л) и восстановитель – сульфита натрия (5 г/л), а также в присутствии и отсутствии воздуха [13, с.75; 14, с.78].

Процесс проводили при соотношении Т: Ж = 1:2 (250 г : 500 мл). Необходимо отметить, что исходный тиосульфатный раствор имеет слабощелочные свойства. Состав выщелачивающего раствора: руда – 250 гр., вода – 500 мл, $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ – 40 г/л и несколько других компонентов. Результаты опытов приведены в таблице 1 [15, с.361].

Таблица 1. Результаты опытов по тиосульфатно-аммиачному выщелачиванию золота из отобранного руды месторождения «Тутлы»

Table 1. Results of experiments on thiosulfate-ammonia leaching of gold from the selected ore of the Tutli deposit

№ опыта	Подача воздуха	Время, ч	Состав выщелачивающего раствора					Добавки		рН раствора		Степень извлечения, %	
			Na ₂ SO ₃ , г/л	Na ₂ SO ₄ , г/л	(NH ₄) ₂ SO ₄ , моль/л	NH ₄ OH, мл/л	H ₂ SO ₄ , 0,2Н	NH ₄ OH, мл/л	H ₂ O, мл/л	Исходного	Конечного	Au	Ag
60 °С													
1	+	2	-	10	-	-	+	-	120	6,1	7,94	2,64	2,12
2	+	3	-	-	0,2	-	+	-	120	3,9	7,92	41,9	22,2
3	+	4	5	-	0,2	-	-	-	112	9,06	8,1	45,1	20,3
4	+	5	-	-	0,2	100	-	-	150	10,07	8,73	65,4	44,3
75 °С													
5	+	2	-	10	-	-	-	-	400	9,37	8,86	2,60	1,91
6	+	3	-	-	0,2	-	-	-	400	7,05	7,72	50,0	11,8
7	-	4	5	-	0,2	50	-	50	190	11,01	8,93	66,5	26,6
8	-	5	5	10	-	50	-	50	190	11,61	9,47	68,4	26,9
80 °С													
9	+	2	5	-	0,2	50	-	50	190	10,43	8,32	66,4	32,5
10	+	3	5	10	-	50	-	50	190	10,91	8,73	67,1	34,6
11	+	4	-	-	0,2	50	-	50	190	10,20	8,35	66,3	31,8
12	+	5	-	10	-	50	-	50	190	11,73	9,04	68,9	40,8
В присутствии воздуха и отсутствии восстановителя при 60 °С													
13	+	2	-	-	0,2	50	-	50	65	10,20	9,32	79,8	20,3
14	+	3	-	10	-	50	-	50	70	10,82	10,0	77,4	22,2
15	+	4	-	-	0,2	50	-	50	60	9,87	9,02	78,0	19,8
16	+	5	-	10	-	50	-	50	70	11,35	9,53	80,0	25,3

Таблица 2. Сопутствующая таблица для системы (5)

Table 2. Companion table for the system (5)

	y ₁	x ₁	x ₂	x ₃	x ₁ y ₁	x ₂ y ₁	x ₃ y ₁	x ₁ ²	x ₁ x ₂	x ₁ x ₃	x ₂ ²	x ₂ x ₃	x ₃ ²
	2,64	2	6,1	7,94	5,28	16,104	20,9616	4	12,2	15,88	37,21	48,434	63,044
	41,9	3	3,9	7,92	125,7	163,41	331,848	9	11,7	23,76	15,21	38,888	62,726
	45,1	4	9,06	8,1	180,4	408,606	365,31	16	36,24	32,4	82,084	73,386	65,61
	65,4	5	10,1	8,73	327,0	658,578	570,942	25	50,35	43,65	101,41	87,911	76,213
Σ:	155,04	14	29,13	32,69	638,38	1246,70	1289,07	54	110,5	115,7	235,91	248,62	267,59

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n, (2)$$

где y – зависимая переменная, x_1, x_2, \dots, x_n – независимые переменные, $a_0, a_1, a_2, \dots, a_n$ – коэффициенты уравнения. Для вычисления коэффициентов применяется метод наименьших квадратов. Здесь возникает задача минимизации функции многих переменных

$$f(a_0, a_1, a_2, \dots, a_n)$$

$$= \sum_{i=1}^n (a_0 + a_1x_1 + \dots + a_nx_n - y_i)^2 \rightarrow \min. (3)$$

Находя частные производные функции f по $a_i, i = 1, n$, получаем следующую систему уравнений:

Таблица 3. Сопутствующая таблица для вывода уравнения (7)
Table 3. Companion table for equation deriving (7)

y_2	x_1	x_2	x_3	x_1y_2	x_2y_2	x_3y_2	x_1^2	x_1x_2	x_1x_3	x_2^2	x_2x_3	x_3^2
2,6	2	9,37	8,86	5,2	24,362	23,036	4	18,74	17,72	87,7969	83,0182	78,4996
50,0	3	7,05	7,72	150,0	352,5	386,0	9	21,15	23,16	49,7025	54,426	59,5984
66,5	4	11,0	8,93	266,0	732,165	593,845	16	44,04	35,72	121,220	98,3193	79,7449
68,4	5	11,6	9,47	342,0	794,124	647,748	25	58,05	47,35	134,792	109,947	89,6809
Σ : 187,5	14	39,1	35,0	763,2	1903,15	1650,63	54	141,98	123,95	393,512	345,710	307,524

Таблица 4. Сопутствующая таблица для вывода уравнения (8)
Table 4. Companion table for equation deriving (8)

y_3	x_1	x_2	x_3	x_1y_3	x_2y_3	x_3y_3	x_1^2	x_1x_2	x_1x_3	x_2^2	x_2x_3	x_3^2
66,4	2	10,43	8,32	132,8	692,552	552,448	4	20,86	16,64	108,7849	86,7776	69,2224
67,1	3	10,9	8,73	201,3	732,061	585,783	9	32,73	26,19	119,028	95,2443	76,2129
66,3	4	10,2	8,35	265,2	676,26	553,605	16	40,8	33,40	104,04	85,17	69,7225
68,9	5	11,7	9,04	304,5	808,197	622,856	25	58,65	45,20	137,593	106,0392	81,7216
Σ : 268,7	14	43,3	34,44	903,8	2909,1	2314,65	54	153,1	121,4	469,446	373,231	296,879

$$\left\{ \begin{array}{l} a_0 N + a_1 \sum x_1 + a_2 \sum x_2 + \dots + a_n \sum x_n = \sum y, \\ a_0 \sum x_1 + a_1 \sum x_1^2 + a_2 \sum x_1 x_2 + \dots \\ \quad + a_n \sum x_1 x_n = \sum x_1 y, \\ a_0 \sum x_2 + a_1 \sum x_1 x_2 + a_2 \sum x_2^2 \dots \\ \quad + a_n \sum x_2 x_n = \sum x_2 y, (4) \\ \dots \\ a_n \sum x_n + a_1 \sum x_1 x_n + \\ \quad + a_2 \sum x_2 x_n + \dots + a_n \sum x_n^2 = \sum x_n y. \end{array} \right.$$

Для определения зависимости степени извлечения золота Au (мас., %) при $t=60$ °C от времени (x_1 , ч), pH раствора (x_2 , исх.) и pH раствора (x_3 , конеч.) (см. таблица 1, опыты 1-4) с использованием метода наименьших квадратов и систему уравнений (4), составим систему (5) (после подсчета соответствующих сумм (таблица 2):

$$\left\{ \begin{array}{l} 4a_0 + 14a_1 + 29,13a_2 + 32,69a_3 = 155,04; \\ 14a_0 + 54a_1 + 110,49a_2 + 115,69a_3 = 638,38; \\ 29,13a_0 + 110,49a_1 + 235,9085a_2 + 248,6191a_3 = \\ \quad = 1246,698; (5) \\ 32,69a_0 + 115,69a_1 + 248,6191a_2 + 267,5929a_3 = \\ \quad = 1289,0616. \end{array} \right.$$

Решая данную систему методом Крамера (с помощью стандартной программы), находили следующие коэффициенты a_0 , a_1 , a_2 , a_3 :

$$a_0 = 10,0734; a_1 = 20,8571; a_2 = -0,02206; a_3 = -5,2256.$$

Таким образом, уравнение регрессии выражается следующим образом:

$$\begin{aligned} y_1 &= 10,0734 \\ &+ 20,8571x_1 - 0,02206x_2 - 5,2256x_3. (6) \end{aligned}$$

Аналогично при использовании данных таблиц 3 и 4 получены уравнения регрессии для опытов 5-8 вида (при $t=75$ °C)

$$y_2 = 289,33 + 21,5748x_1 + 14,9151x_2 - 53,0073x_3 (7)$$

и опыта 9-12 вида при (при $t=80$ °C)

$$y_3 = 391,7 - 15,5521x_1 + 25,0598x_2 - 91,102x_3. (8)$$

Вывод

На основании анализа результатов математического моделирования тиосульфатного выщелачивания золота из золотосодержащих руд месторождения «Истиклол» можно отметить следующее:

1. После вывода уравнений регрессии зависимости степени извлечения золота от времени и различных растворов можно подсчитать проценты отклонения эмпирических и опытных данных по точкам из равенства

$$(y_{\text{выч.}} - y_{\text{опыт.}}) \times \frac{100\%}{y_{\text{опыт.}}}$$

2. На основании приведенных математических расчетов предложены три модели зависимости степени извлечения золота от трех факторов при различных температурах.

3. Установлена линейная связь полученных уравнений регрессии. Можно использовать другие виды зависимостей и методов, например, номографический метод.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жуков В.В., Шариков Ю.В., Турунен И. Математическое моделирование процесса тиосульфатного выщелачивания золота в каскаде реакторов идеального перемешивания // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). Отдельная статья (специальный выпуск). – № ОС 14. Москва, – 2013. – № 5. – С.3-11.
2. Abbruzzese C., Fornari P., Massidda R., Vegliò F., Ubaldini S. Thiosulphate leaching for gold hydrometallurgy. *Hydrometallurgy*, 1995. №39, 265-276.
3. Гаськова О.Л. Разработка физико-химической модели окислительного растворения золото- и серебросодержащих сульфидов в природных рудах и техногенных отвалах сульфидных месторождений // Отчет о НИР № 96-05-65888 (Российский фонд фундаментальных исследований).
4. Zhang X.M., Senanayake G., Nicol M.J. Beneficial effect of silver in thiosulfate leaching of gold, *hydrometallurgy, proceeding of the sixth international symposium*, ed. Courtney a. Young, 2008. P. 801.
5. Ни Л.П., Печерская Н.Ф., Береза Л.В. Математические модели гидрохимических процессов глиноземного производства. – Алма-Ата. Наука. 1982. – 123 с.
6. Демиденко Е.А. Линейная и нелинейная регрессия. – М.: Финансы и статистика, 1981. – 304 с.
7. Mahmoud M.H., Awad H.M. Recovery of gold from tailings of al-amar mine in Saudi Arabia, *sips 2016, sustainable industrial processing summit and exhibition, vol 5, starkey intl. Symp. / mineral processing*, ed. F. Kongoli, Sanya, China, 6-10 nov. 2016. P. 201.
8. Закс Л. Статистическое оценивание. – М.: Статистика, 1976. – 598 с.
9. Линник Ю.А. Метод наименьших квадратов и основы теории обработки наблюдений. – М.: Физматгиз, 1962. – 350 с.
10. Мостеллер Ф., Тьюки Дж. Анализ данных и регрессия. – М.: Финансы и статистика, 1982, вып.1, 320 с.
11. А.Е. Воробьев, К.Г. Каргинов, А.А. Шелкин, Т.В. Чекушина. Практика применения тиосульфатного выщелачивания благородных металлов из природных материалов. – М.: «Неделя горняка-2002», семинар №15. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/praktika-primeneniya-tiosulfatnogo-vyschelachivaniya-blagorodnyh-metallov-iz-prirodnyh-materialov/viewer>.
12. Холов Х.И., Самихов Ш.Р., Холов Ш.Е. Моделирование технологических процессов выщелачивание золота из хвостов флотации руды нижних горизонтов месторождения Джижикрута. Научное знание современности. Материалы Международных научно-практических мероприятий Общества Науки и Творчества. Казань, 2019, № 5 (29), – С.75-86.
13. Самихов Ш.Р., Зинченко З.А., Шерматов Н. Математическое моделирование хлоридовозгоночного обжига концентрата месторождения Чоре. – Изв. АН РТ, 2013, №3, с. 78-84.
14. Самихов Ш.Р., Шарифбоев Н.Т., Назаров Х.М., Хочиен М.К. Тиосульфатное выщелачивание золота и серебра из золотосодержащих руд месторождения «Истиклол» // Вестник ТНУ, 2018 – №3, С.203-209.
15. Zipperian D., Raghavan S., Wilson J.P. Gold and silver extraction by ammoniacal thio-sulfate leaching from a rhyolite ore. *Hydrometallurgy*. 1988. 19, 361-375.

REFERENCES

1. V.V. Zhukov, Yu.V. Sharikov, I. Turunen. Mathematical modeling of the process of thiosulfate leaching of gold in a cascade of ideal mixing reactors // *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. Separate article (special issue). – No. OS 14. Moscow, – 2013. – No. 5. – P.3-11.
2. C. Abbruzzese, P. Fornari, R. Massidda, F. Veglio, S. Ubaldini. Thiosulphate leaching for gold hydrometallurgy. *Hydrometallurgy*, 1995. №39, 265-276.
3. O.L. Gaskova. Development of a physicochemical model of oxidative dissolution of gold- and silver-containing sulfides in natural ores and technogenic dumps of sulfide deposits // *Report on research work No. 96-05-65888 (Russian Foundation for Basic Research)*.
4. X.M. Zhang, G. Senanayake, M.J. Nicol. Beneficial effect of silver in thiosulfate leaching of gold, *hydrometallurgy, proceeding of the sixth international symposium*, ed. Courtney a. Young, 2008. P.801.
5. L.P. Ni, N.F. Pecherskaya, L.V. Bereza Mathematical models of hydrochemical processes in alumina production. – Alma-Ata. The science. 1982. – 123 p.
6. Demidenko E.A. Linear and nonlinear regression. - M.: Finance and statistics, 1981. - 304 p.
7. M.H. Mahmoud, H.M. Awad. Recovery of gold from tailings of Al-amar mine in Saudi Arabia, *sips 2016, sustainable industrial processing summit and exhibition, vol 5, starkey intl. Symp. / Mineral processing*, ed. F.

Kongoli, Sanya, China, 6-10 nov. 2016. P. 201.

8. Sachs L. Statistical estimation. - M.: Statistics, 1976. – 598 p.
9. Yu.A. Linnik. The method of least squares and the foundations of the theory of observation processing. – M.: Fizmatgiz, 1962. – 350 p.
10. F. Mosteller, J. Tukey. Data Analysis and Regression. - M.: Finance and statistics, 1982, issue 1, 320 p.
11. A.E. Vorobiev, K.G. Karginov, A.A. Shelkin, T.V. Chekushin. The practice of using thiosulfate leaching of precious metals from natural materials. - M.: «Miner's Week-2002», seminar №15. – Access mode: <https://cyberleninka.ru/article/n/praktika-primeneniya-tiosulfatnogo-vyschelachivaniya-blagorodnyh-metallov-iz-prirodnih-materillov/viewer>.
12. Kh.I. Kholov, Sh.R. Samikhov, Sh.Y. Kholov. Modeling of technological processes of gold leaching from ore flotation tailings of the lower horizons of the Dzhizhikrut deposit. Scientific knowledge of our time. Materials of the International Scientific and Practical Events of the Society of Science and Creativity. Kazan, 2019, No. 5 (29), - P.75-86.
13. Sh.R. Samikhov Z.A. Zinchenko, N. Shermatov. Mathematical modeling of chloride sublimation roasting of concentrate of the Chore deposit. – Proceeding of the Academy of Sciences Republic of Tajikistan, 2013, No.3, P. 78-84.
14. Sh.R. Samikhov, N.T. Sharifboyev, H.M. Nazarov, M.K. Khochiyon Thiosulfate leaching of gold and silver from gold-bearing ores of the Istiklol deposit // Bulletin TNU, 2018, No. 3, P.203-209.
15. D. Zipperian, S. Raghavan, J.P. Wilson. Gold and silver extraction by ammoniacal thio-sulfate leaching from a rhyolite ore. Hydrometallurgy. 1988. 19, 361-375.

Поступило в редакцию 06.03.2021

Received 06 March 2021