

Ногаева К.А.

**АЛТЫН КАМТЫЛГАН КЕНДЕРДИ ТИОМОЧЕВИНА МЕНЕН ЭРИТМЕГЕ
ӨТКӨРҮҮ ПРОЦЕССИН ОПТИМАЛДАШТЫРУУ**

Ногаева К.А.

**ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ ЗОЛОТОСОДЕРЖАЩЕЙ РУДЫ
ТИОМОЧЕВИНОЙ**

К.А. Nogaeva

OPTIMIZATION OF THE LEACHING OF GOLD ORE THIOUREA

УДК: 553.41:681.5.015

Бул макалада алтын камтылган кендерди эритмеге өткөрүү процессин оптималдаштыруу ыкмасы келтирилген.

В данной статье приведены методы оптимизации процесса выщелачивание золотосодержащей руды.

This article describes the optimization methods of leaching process of gold ore.

При разработке новых процессов эффективным является применение метода планирования экстремальных экспериментов [1,2]. С развитием математической теории экстремальных экспериментов появилась возможность выбора оптимальной стратегии исследования.

Это приводит к значительному сокращению объема экспериментальных работ, так как позволяет извлечь максимум информации при минимальном числе опытов. Другим достоинством указанного метода является получение статистической математической модели процесса, которая в дальнейшем может использоваться для расчета оптимального режима.

Планирование эксперимента - это новый подход к исследованию, в котором математическим методам отводится активная роль. В настоящее время имеется ряд хорошо сформулированных критериев оптимального планирования. Для них разработаны алгоритмы, пользуясь которыми можно располагать экспериментальные точки в факторном пространстве и производить обработку результатов экспериментов [3].

В данной статье рассмотрен процесс выщелачивания, в котором выход продукта зависит от концентраций: выщелачивающего агента - тиомочевина (Thio), окислителя Fe^{+3} . Требуется с помощью полного факторного эксперимента найти математическое описание этого процесса в окрестности точки факторного пространства с координатами $x_{01}=0,065$ моль/л; $x_{02}=0,015$ г-ион/л.

Для определения воспроизводимости опытов ставили 3 серии опытов, каждую повторяя параллельно. Результаты опытов на воспроизводимости приведены в таблице 1.

X_1 – концентрация Thio, моль/л;

X_2 – концентрация Fe^{+3} , г-ион/л;

y – извлечение металлов в концентрат, %

\bar{Y} – усредненное значение степени извлечения, %

S – оценка дисперсии каждого опыта

Таблица 1

Результаты и условия проведения опытов на восприимчивость

	Условие		Золото		\bar{Y}_{Au}	S_{Au}
	X_1	X_2	Y_1	Y_2		
1	0,06	0,015	97,3	97,1	97,2	3.64
2	0,1	0,15	69.1	72.1	70.6	4.5
3	0,01	0,02	72.3	65.5	68.9	23.1 !

Оценка дисперсии для каждой серии опытов вычисляется по формуле 1.

$$S_{ji}^2 = 1/R - 1 \sum Cy_{ji} - \omega_j)^2; \quad (1)$$

$$S_{Au1}^2 = (97,3 - 97,2)^2 + (97,1 - 97,2)^2 = 0,02$$

$$S_{Au2}^2 = (69.1 - 70.6)^2 + (72.1 - 70.6)^2 = 4.5$$

$$S_{Au3}^2 = (72.3 - 68.9)^2 + (65.5 - 68.9)^2 = 23.12$$

Для воспроизводимости опытов находим отношение наибольшей из оценок дисперсий к сумме всех оценок дисперсий для расчета критерия Кохрена по формуле 2:

$$G_p = \max S^2_{\varphi} / \Sigma S^2_{ji} \quad (2)$$

$$G_{pAu} = 23.5 / 27.64 = 0.85$$

Табличное значение критерия Кохрена G при доверительной вероятности P = 0.95 и числе степеней свободы f = R - 1 = 2 - 1 = 1 и N = 3 равняется G = 0.967.

Условие Gr < G выполняется, и следовательно опыты для планирования воспроизводимы.

Оценку дисперсии воспроизводимости вычисляем по формуле 3

$$S^2_{y} = 1/N \Sigma S^2_{ji} \quad (3)$$

$$S^2_{yAu} = 1/3 (0.02 + 4.5 + 23.12) = 27.64$$

Оценку дисперсии среднего значения рассчитываем по формуле 4

$$S^2_{\omega} = S^2_{y} / R; \quad (4)$$

где, R- количество параллельных опытов;

$$S^2_{\text{плAu}} = 27.64 / 2 = 13.82$$

Основные характеристики плана проведения экспериментов приведены в таблице 2, матрица планирования эксперимента приведена в таблице 3.

Таблица 2

Основные характеристики плана эксперимента

Характеристика	Факторы эксперимента	
	X ₁ Thio, моль/л	X ₁ Fe ³⁺ , г-ион/л
Основной уровень	0,06	0,015
Интервал варьирования	0,05	0,05
Верхний уровень	0,11	0,65
Нижний уровень	0,01	0,04

Таблица 3

Полный двухфакторный эксперимент

№№	Матрица		Факторы		Извлечение: юлота, % ω _{Au}
	X ₁	X ₂	X ₁	X ₁	
1	-	-	0,01	0,04	52.85
2	+	-	0,11	0,04	70.6
3	-	+	0,01	0,065	68.9
4	+	+	0,11	0,065	72.2

Математическое описание рассматриваемого процесса будем искать в виде уравнения регрессии:

$$\omega = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 \quad (5)$$

где, b_i- коэффициент регрессии;

На основании полного факторного эксперимента находим коэффициенты регрессии по формулам 6 и 7

$$b_0 = 1/n \Sigma y_j \quad (6)$$

$$b_i = 1/n \Sigma x_{ji} y_{ji} \quad (7)$$

$$b_{0Au} = 1/4 (52.85 + 70.6 + 68.9 + 72.2) = 66.137 > \Delta d_{Au}$$

$$b_{1Au} = 1/4 (- 52.85 + 70.6 - 68.9 + 72.2) = 5.26 > \Delta d_{Au}$$

$$b_{0Au} = Y (- 52.85 - 70.6 + 68.9 + 72.2) = 4.4 > \Delta d_{Au}$$

Ошибку в определении коэффициентов регрессии находим по формуле 8

$$S_b = (S^2_{\text{пл}} / n)^{1/2} \quad (8)$$

$$S_{b_{Au}} = (5.225/4)^{1/2} = 1.143$$

Пользуясь [2] находим, что для доверительной вероятности $P = 0.95$ и $f = 3$ значение критерия Стьюдента равно $t = 3.18$.

Для оценки значимости коэффициента регрессии сравниваются величины коэффициента с величиной доверительного интервала, который рассчитывается по формуле 9. Признак незначимости – абсолютное значение доверительного интервала больше, чем абсолютное значение коэффициента регрессии.

$$\Delta d = \pm S_{bt} \quad (9)$$

$$\Delta d_{Au} = 1.143 \times 3.18 = 3.634$$

В данном случае оказалось, что незначимым является только коэффициент регрессии b_{2Cu} хотя уравнение в целом адекватно. Это свидетельствует о трудности оценивать коэффициенты регрессии отдельно даже в том случае, когда независимые переменные весьма слабо коррелированы. И можно сделать вывод, что коэффициенты регрессии в общем значимы.

Уравнения регрессии, после постановки коэффициентов имеют вид:

$$\omega_{Au} = 66.137 + 5.26 X_1 + 4.4 X_2$$

Для проверки адекватности уравнения регрессии находим расчетные значения функции отклика, подставляя значения из матрицы планирования.

$$Y_{1Au}^P = 66.137 - 5.26 - 4.4 = 56.4$$

$$Y_{2Au}^P = 66.137 + 5.26 - 4.4 = 67.0$$

$$Y_{3Au}^P = 66.137 - 5.26 + 4.4 = 65.3$$

$$Y_{4Au}^P = 66.137 + 5.26 + 4.4 = 75.8$$

Оценку дисперсии адекватности уравнения регрессии вычисляем по формуле 10.

$$S_{ад}^2 = 1/n - v \sum (Y_j^э - Y_j^P) \quad (10)$$

где, n – количество опытов;

v – количество коэффициентов, включая свободный член в уравнении регрессии;

$Y_j^э$ – экспериментальное извлечение металлов в концентрат;

Y_j^P – расчетное извлечение металлов в концентрат.

$$S_{ад}^2 Au = (52.85 - 56.4)^2 + (70.6 - 67.0)^2 + (68.9 - 65.3)^2 + (72.2 - 75.8)^2 = 51.48$$

$$S_{ад}^2 Ag = (47.7 - 47.225)^2 + (50.9 - 51.4)^2 + (49.2 - 46.67)^2 + (54.3 - 53.825)^2 = 7.1$$

$$S_{ад}^2 Cu = (30.2 - 36.12)^2 + (55.8 - 51.4)^2 + (52.45 - 49.67)^2 + (58.1 - 53.82)^2 = 80.3$$

Расчетное значение критерия Фишера находим по формуле 11

$$F_p = \max (S_{ад}^2; S_y^2) / \min (S_{ад}^2; S_y^2) \quad (4.1.11)$$

$$F_{pAu} = 51.48/5.225 = 9.85$$

$$F_{pAg} = 7.17/2.55 = 2.8$$

$$F_{pCu} = 80.3/16.4 = 4.9$$

Табличное значение критерия Фишера по [2] равно $F=10$ и условие $F_p < F_{таб}$ выполняется, следовательно уравнение регрессии адекватно.

Полученные уравнения регрессии с кодированными переменными связаны с натуральными переменными соотношениями 12 и 13:

$$X_1 = (N - N_0)/\Delta N \quad (12)$$

$$X_2 = (C - C_0)/\Delta C \quad (13)$$

где, N, C – концентрация Th^{10} и Fe^{+3} ;

$\Delta N, \Delta C$ – интервал варьирования;

N_0, C_0 – начальная концентрация Th^{10} и Fe^{+3} ;

После постановки натуральных величин на X_1 и X_2 уравнение регрессии имеет следующий вид:

$$\omega_{Au} = 64.16 + 105.2 N + 88 C$$

Таким образом получается функция $N = f(C)$ при $\omega_{Au} = const$ $L_K = 1$. Двумерные сечения поверхности отклика приведены на рисунке 1.

Двумерные сечения поверхности отклика

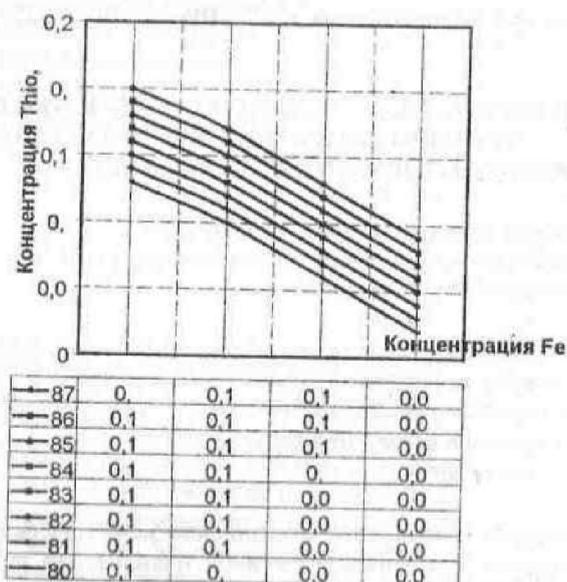


Рис. 1

При выщелачивании приходится иметь дело с экстремальными задачами, когда в качестве критерия оптимизации берется максимум извлечения благородных металлов в концентрат. Однако, влияние указанных факторов неравномерно во всем диапазоне их изменения. Если критерий оптимальности принять минимум концентрации тиомочевины, то задачу оптимизации процесса можно сформулировать следующим образом: найти такую концентрацию тиомочевины, при которой извлечение металлов в раствор будет максимальным. Как видно из рисунка 1, такая концентрация тиомочевины лежит в диапазоне изгиба поверхности отклика, которое определяет максимальное извлечение золота в раствор.

Список литературы

1. Саутин С.К Планирование эксперимента в химии и химической технологии. - Л., «Химия», 1975, с.59.
2. Налимов В.В., Черноva Н.А. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов. - М., «Наука», 1965., с. 158.
3. Протодьяконов М.М., Тедер Р.И. Методика рационального планирования экспериментов. -М., «Наука», 1970, с.250.

Рецензент: к.х.н., доцент Алмакучукова Г.М.