

С. В. МАМЯЧЕНКОВ<sup>1</sup>, Р. А. РАМАЗАНОВА<sup>2\*</sup>, Р. А. БЫКОВ<sup>2</sup>, Н. В. СЕРАЯ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина», Екатеринбург, Россия

<sup>2</sup>Восточно-Казахстанский государственный технический университет им. Д.Серикбаева, Усть-Каменогорск, \*raigul\_77\_33@mail.ru

## ОЦЕНКА ПРОЦЕССА СЕРНОКИСЛОТНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ ЦИНКА ИЗ ТРУДНООБОГАТИМОЙ ОКИСЛЕННОЙ ЦИНКОВОЙ РУДЫ С ПОЗИЦИЙ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Определение оптимальных параметров сернокислотного выщелачивания цинка связано с глубоким анализом процесса, с применением современных методов исследования и электронных систем обработки данных. В данной работе исходным сырьем служила труднообогатимая окисленная цинковая руда, содержащая цинк, свинец, медь, железо, кальций, магний, алюминий, марганец и кремний. В статье рассматривается математическая модель процесса сернокислотного выщелачивания цинка из труднообогатимой окисленной цинковой руды. Полученная теоретическая модель позволяет достаточно точно описать процессы, протекающие в объекте, и допускает экстраполяцию в точки факторного пространства, в которых невозможно непосредственное наблюдение этих процессов. Статистическая модель обработки данных отличается жесткой связью плана эксперимента и формы уравнения регрессии, которое задается в виде полинома. Полученная модель позволяет определять значения различных факторов, таких как концентрация серной кислоты, продолжительность и температура выщелачивания, и оптимизировать процесс сернокислотного выщелачивания цинка из труднообогатимой окисленной цинковой руды. Математическая модель может быть использована при проектировании новых и анализе функционирования действующих гидрометаллургических систем, а также для решения вопросов по установлению расходных норм по сырью, технологическим показателям и определению неучтенных потерь компонентов сырья в условиях промышленной эксплуатации.

**Ключевые слова:** выщелачивание, математическая модель, параметры процесса, окисленная цинковая руда, извлечение, оптимизация.

**Введение.** Выщелачивание – основной технологический передел производства цинка гидрометаллургическим способом, который в значительной мере определяет технико-экономические показатели производства в целом, в первую очередь извлечение металла, расход электроэнергии, себестоимость цинка [1-2].

Цель процесса выщелачивания – более полное извлечение цинка и других полезных компонентов рядового сырья в раствор при минимальном его загрязнении примесями или при низком содержании ценных компонентов в сырье [3].

В данной работе исходным сырьем служила труднообогатимая окисленная цинковая руда, содержащая цинк, свинец, медь, железо, кальций, магний, алюминий, марганец и кремний.

Определение оптимальных параметров сернокислотного выщелачивания цинка связано с глубоким анализом процесса, с применением современных методов исследования и электронных систем обработки данных. Полученные теоретические модели позволяют достаточно точно описать процессы, протекающие в объекте, и допускают экстраполяцию в точки факторного пространства,

в которых невозможно непосредственное наблюдение этих процессов [4].

Статистические модели обработки данных отличаются жесткой связью плана эксперимента и формы уравнения регрессии, которое задается обычно в виде полинома.

Вероятностно-детерминированные методы планирования эксперимента определяются: оптимальным соотношением формальных и творческих процедур; получением многофакторного уравнения регрессии. Уравнение регрессии состоит в разделении на частные зависимости: сильные и слабые; алгебраическим описанием сильных зависимостей и коррекцией экспериментальных данных по ним; повторной выборкой до получения неискаженных слабых частных зависимостей при их алгебраическом описании и объединении сильными зависимостями.

**Экспериментальная часть и обсуждение результатов.** В работе рассматривается математическая модель процесса сернокислотного выщелачивания цинка из труднообогатимой окисленной цинковой руды. Основными факторами, влияющими на извлечение цинка в продуктивный

раствор, являются концентрация серной кислоты ( $x_1$ ), продолжительность ( $x_2$ ) и температура выщелачивания ( $x_3$ ).

Уравнения регрессии представлены в виде полиномов второго порядка. Условия и результаты экспериментов представлены в таблице 1.

По данным таблицы 1 рассчитаны уравнения регрессии для процессов выщелачивания окисленной цинковой руды [5-7].

Адекватность уравнения регрессии (модели) оценивалась с помощью коэффициента множественной корреляции  $R=0,97607$  и коэффициента детерминации  $R^2=0,91625$ .

Проверку значимости уравнения регрессии проводили на основе вычисления F-критерия Фишера, значения которого составляет  $F=3,25398$  (при доверительной вероятности 0,95 табличное значение составляет  $F_{табл.}=3,008787$ ), так как расчетное значение больше табличного, то модель следует признать адекватной [8-10].

Таблица 1 – Влияние различных факторов на извлечение цинка в продуктивный раствор

№ опыта	Концентрация $H_2SO_4$ , г/дм <sup>3</sup>	Продолжительность, мин	Температура, °C	Извлечение цинка в продуктивный раствор, %	
				эксперимент	расчетное
1	140	10	60	77,32	76,89
2	140	20	60	79,55	80,27
3	140	40	60	80,62	79,01
4	140	48	48	63,36	65,22
5	140	48	72	86,07	84,93
6	140	60	25	55,00	55,46
7	140	72	48	59,81	59,83
8	140	72	72	75,95	74,45
9	160	10	60	57,84	58,24
10	160	20	60	59,11	60,05
11	160	40	60	68,92	69,33
12	160	48	48	72,36	71,74
13	160	48	72	83,57	81,56
14	160	60	25	75,84	74,48
15	160	72	48	66,56	67,03
16	160	72	72	72,81	72,57
17	180	10	60	78,22	79,28
18	180	20	60	79,85	79,96
19	180	40	60	81,72	80,41
20	180	48	48	84,41	84,08
21	180	48	72	89,41	89,03
22	180	60	25	84,89	85,18
23	180	72	48	74,92	74,09
24	180	72	72	77,68	76,79

По данным таблицы 1 построены поверхности, отражающие влияние продолжительности и температуры на извлечение цинка в продуктивный раствор при разной концентрации серной кислоты (рисунки 1-3).

Уравнение регрессии (модели) рисунка 1 имеет вид:

$$Y = 18,3479 + 0,913715x_2 + 0,464064x_3 - 0,0114062x_2x_3 - 0,0050888x_2^2 + 0,00836314x_3^2 \quad (1)$$

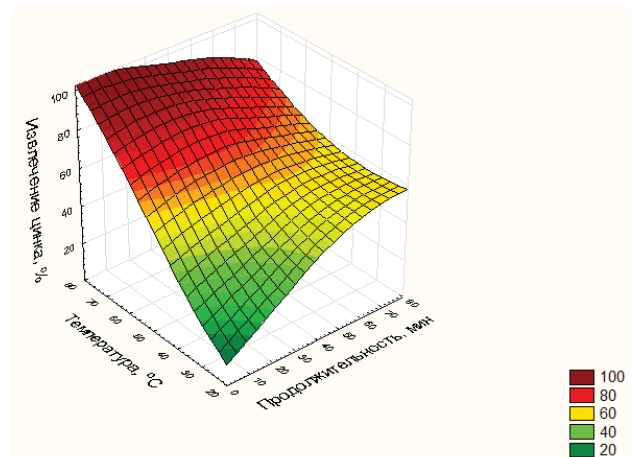


Рисунок 1 - Зависимость степени извлечения цинка в раствор от температуры и продолжительности выщелачивания при концентрации  $H_2SO_4 - 140$  г/дм<sup>3</sup> (крупность руды -1+0 мм)

Уравнение регрессии (модели) рисунка 2 имеет вид:

$$Y = 40,0593 - 0,166646x_2 + 0,227226x_3 + 0,00759274x_2x_3 + 0,000102591x_2^2 + 0,00254157x_3^2 \quad (2)$$

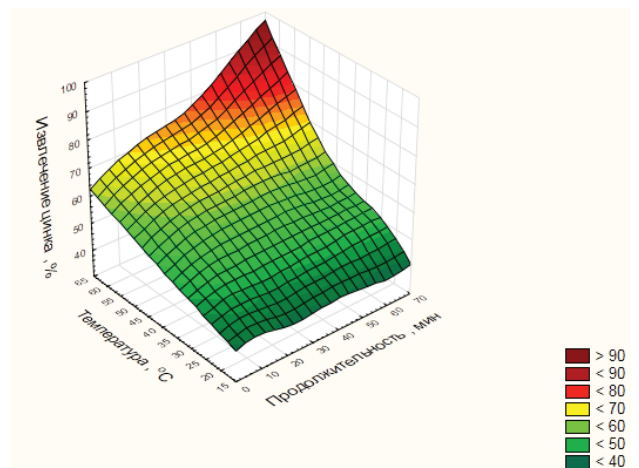


Рисунок 2 - Зависимость степени извлечения цинка в раствор от температуры и продолжительности выщелачивания при концентрации  $H_2SO_4 - 160$  г/дм<sup>3</sup> (крупность руды -1+0 мм)

Уравнение регрессии (модели) рисунка 3 имеет вид:

$$Y = 78,6907 + 0,909092x_2 - 0,697208x_3 - 0,00388889x_2x_3 - 0,00846227x_2^2 + 0,00932921x_3^2 \quad (3)$$

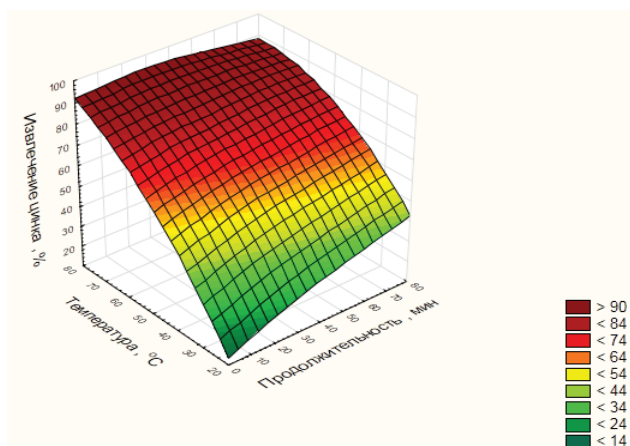


Рисунок 3 - Зависимость степени извлечения цинка в раствор от температуры и продолжительности выщелачивания при концентрации  $H_2SO_4 - 180$  г/дм<sup>3</sup> (крупность руды -1+0 мм)

Из рисунков 1-3, где приведены зависимости степени извлечения цинка при различных концентрациях  $H_2SO_4 - 140, 160, 180$  г/дм<sup>3</sup>, видно, что с увеличением температуры и продолжительности выщелачивания увеличивается извлечение цинка в раствор. Наиболее существенное влияние оказывает продолжительность выщелачивания при исходной концентрации  $H_2SO_4 - 140$  г/дм<sup>3</sup>.

При концентрации  $H_2SO_4 - 160$  г/дм<sup>3</sup> высокое извлечение цинка в раствор достигается только при высокой температуре и продолжительности выщелачивания более 60 мин.

При концентрации  $H_2SO_4 - 180$  г/дм<sup>3</sup> и температуре 70-80 °C степень извлечения цинка составляет более 85 %, высокое извлечение достигается в первой минуте выщелачивания. Влияние продолжительности процесса на извлечение цинка существенно только при низких температурах. Низкое извлечение цинка при температурах 25-40 °C характерно для всех исходных концентраций серной кислоты.

По данным проведенных экспериментов при различных концентрациях  $H_2SO_4$  была построена обобщающая математическая модель процесса, показывающая роль всех факторов, таких как концентрация, температура и продолжительность на извлечение цинка в раствор при выщелачивании руды месторождения «Шаймерден»:

$$Y = 82,6709 + 0,819093x_1 + 0,716207x_2 + 0,657195x_3 - 0,00398789x_1x_2 - 0,00856133x_1^2 + 0,00962431x_2^2 + 0,007235x_3^2 \quad (4)$$

При исходной концентрации  $H_2SO_4 - 160$  г/дм<sup>3</sup> и температуре 60 °C время, необходимое для извлечения цинка в раствор, составляет не более 60 мин. Повышение исходных концентраций до 180 г/дм<sup>3</sup> приводит к тому, что pH конечного раствора

выщелачивания составляет 1,2-1,3, что значительно затрудняет его дальнейшую переработку. Тогда как при концентрации  $H_2SO_4 - 160$  г/дм<sup>3</sup> pH=1,7-2, что облегчает переработку конечных растворов.

На основании проведенных исследований по определению математической модели (уравнение регрессии) процесса сернокислотного выщелачивания цинка из труднообогатимой окисленной цинковой руды было установлено следующее:

1. Свободный член в уравнениях модели увеличивается с ростом исходных концентраций  $H_2SO_4 - 18,3479; 40,0593; 78,6907$  соответственно. Это свидетельствует о том, что при высокой исходной кислотности раствора извлечение цинка в раствор слабо зависит от таких факторов как продолжительность и температура выщелачивания. При концентрации  $H_2SO_4 - 140$  г/дм<sup>3</sup> определяющим фактором для извлечения цинка в раствор является температура, а влияние времени менее заметно.

2. Значимые коэффициенты при факторах  $x_1^2$  говорят о том, что зависимости извлечения цинка в раствор, как от температуры, так и от продолжительности процесса являются нелинейными. Взаимное влияние факторов однозначно определить не удалось.

3. Анализ всех моделей показывает наибольшее влияние на извлечение цинка в раствор температуры процесса, особенно при низких исходных концентрациях  $H_2SO_4$ .

**Выводы.** Математическая модель может быть использована при проектировании новых и анализе функционирования действующих гидрометаллургических систем, а также для решения вопросов по установлению расходных норм по сырью, технологическим показателям и определению неучтенных потерь компонентов сырья в условиях промышленной эксплуатации. Следует учесть, что модель справедлива для следующих интервалов изменения факторов: исходная концентрация серной кислоты ( $x_1$ ) 140-180 г/дм<sup>3</sup>, продолжительность выщелачивания ( $x_2$ ) 10-72 мин, температура ( $x_3$ ) 25-72°C.

#### ЛИТЕРАТУРА

- 1 Снурников А.П. Гидрометаллургия цинка: учеб. пособие. – М.: Металлургия, 1981. – 382 с.
- 2 Казанбаев Л.А., Козлов П.А., Кубасов В.Л. Гидрометаллургия цинка. Процессы выщелачивания. – М.: Руда и Металлы, 2007. – 120 с.
- 3 Рамазанова Р.А., Серая Н.В., Быков Р.А. Кинетические исследования выщелачивания окисленной цинковой руды // Современные тенденции развития науки и технологий: Матер. X Междунар. науч.-практ. конф. - Белгород, Россия, 2016. - № 1-1. - С. 106 - 109.
- 4 Ramazanova R., Bykov R., Van Y. Optimization of oxidized zinc-containing ores processing technology // Actual Problems of Economics. – Kiev, 2016. – № 2(176). – С. 429 – 439.

5 Вольдман Г.М., Зеликман А.Н. Теория гидрометаллургических процессов. – М.: Интермет Инжиниринг, 2003, – 464 с.

6 Перегудов А.В., Пушкарева Т.П. Введение в математическое моделирование химических процессов, практикум к элективному курсу. – 2-е изд. – Красноярск: КГПУ им. В.П. Астафьева, 2013. - 54 с.

7 Кафаров В.В. Принципы математического моделирования химико-технологических систем: учеб. пособие. – М.: Химия, 1974. – 343 с.

8 Горенский Б.М., Лапина Л.А., Любанова А.Ш., Паршаков А.В., Шигапов Р.А., Капустина С.В. Моделирование процессов и объектов в металлургии: конспект лекций. – Красноярск: ИПК СФУ, 2008. – 97 с.

9 Цымбал В.П. Математическое моделирование металлургических процессов. – М.: Металлургия, 1986 – 240 с.

10 Рамазанова Р.А., Серая Н.В., Быков Р.А., Мамяченков С.В. Оптимизация технологии переработки окисленных цинк-содержащих руд // Вестник ВКГТУ. - Усть-Каменогорск., 2016. – № 2. – С. 74 – 78.

REFERENCES

1 Snurnikov A.P. *Gidrometallurgiya tsinka: ucheb. posobie* (Zinc hydrometallurgy: tutorial). Moscow: Metallurgy. **1981**, 382. (in Russ.).

2 Kazanbaev L.A., Kozlov P.A., Kubasov V.L. *Gidrometallurgiya tsinka. Protsessy vyshchelachivaniya* (Zinc Hydrometallurgy. Leaching processes). Moscow: Ruda i Metally, **2007**. 120. (in Russ.).

3 Ramazanova R.A., Seraya N.V., Bykov R.A. *Kineticheskoe issledovaniya vyshchelachivaniya okislennoy tsinkovoy rudy* (Kinetic study of leaching of oxidized zinc ore). *Sovremennye tendentsii razvitiya nauki i tekhnologii: Mater. X Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* (Modern trends in the development of science and technolo-

gy: Proceedings of X International scientific-practical conference) Belgorod, Russia, **2016**. 1-1. 106-109. (in Russ.).

4 Ramazanova R., Bykov R., Van Y. Optimization of oxidized zinc-containing ores processing technology. *Actual Problems of Economics. Kiev*, **2016**. 2(176), 429-439 (in Eng.).

5 Vol'dman G.M., Zelikman A.N. *Teoriya gidrometallurgicheskikh protsessov* (Theory of hydrometallurgical processes). Moscow: Internet Inzhiniring. **2003**, 464. (in Russ.).

6 Peregudov A.V., Pushkareva T.P. *Vvedenie v matematicheskoe modelirovanie khimicheskikh protsessov, praktikum k elektivnomu kursu* (Introduction to the mathematical modeling of chemical processes, workshop for elective courses). 2<sup>nd</sup> edition. Krasnoyarsk: V.P. Astaf'yev's Krasnoyarsk State Pedagogical University, **2013**. 54 (in Russ.)

7 Kafarov V.V. *Printsipy matematicheskogo modelirovaniya khimiko-tekhnologicheskikh sistem: ucheb. posobie* (Principles of mathematical modeling of chemical processes: tutorial). Moscow: Chemistry. 1974. 343. (in Russ.).

8 Gorenskiy B.M., Lapina L.A., Lyubanova A.Sh., Parshakov A.V., Shigapov R.A., Kapustina S.V. *Modelirovanie protsessov i ob'ektov v metallurgii: konspekt lektsiy* (Modelling of processes and objects in metallurgy: lecture notes). Krasnoyarsk: IPK SFU, **2008**. 97. (in Russ.).

9 Tsybmal V.P. *Matematicheskoe modelirovanie metallurgicheskikh protsessov* (Mathematical modeling of metallurgical processes). Moscow: Metallurgy. **1986**, 240. (in Russ.).

10 Ramazanova R.A., Seraya N.V., Bykov R.A., Mamyachenkov S.V. *Optimizatsiya tekhnologii pererabotki okislennoy tsink-soderzhashchikh rud* (Optimization of technology for the processing of oxidized zinc containing ores). *Vestnik VKGTU = Bulletin of East Kazakhstan State Technical University. Ust'-Kamenogorsk*, **2016**. 2, 74 – 78. (in Russ.).

ТҮЙІНДЕМЕ

Мырышты күкірт қышқылды ерітінділеудің оңтайлы параметрлерін анықтау зерттеудің заманауи әдістерін және деректерді өңдеудің электрондық жүйелерін қолдана отырып, үрдіске терең талдау жасаумен байланысты. Алынған теориялық модельдер белгілі бір объекте жүретін үрдістерді дәлме-дәл сипаттауға және бұл үрдісті тура бақылау мүмкін емес факторлық кеңістікте электрополяциялауға мүмкіндік береді. Деректерді өңдеудің статистикалық модельдері полином түрінде берілетін тәжірибе жоспары және регрессия теңдеуімен қатаң байланысты. Бұл жұмыста құрамында мырыш, қорғасын, мыс, темір, кальций, магний, алюминий, марганец және кремний кездесетін қиын байытылатын тотыққан мырыш кені бастапқы шикізат болып табылды. Мақалада қиын байытылатын тотыққан мырыш кенінен мырышты күкірт қышқылды ерітінділеудің математикалық моделі қарастырылды. Алынған модель күкірт қышқылы концентрациясы, ерітінділеу ұзақтығы және ерітінділеу температурасы сияқты әр-түрлі факторлардың шығындарын анықтауға, сонымен қатар қиын байытылатын тотыққан мырыш кенінен мырышты күкірт қышқылды ерітінділеу үрдісін оңтайландыруға мүмкіндік береді. Математикалық модель қолданыстағы гидрометаллургиялық жүйелердің қызмет етуіне талдау жасауға және жаңа жүйелерді жобалауға мүмкіндік береді. Сондай-ақ шикізат бойынша шығындық ережелерді белгілеу, технологиялық көрсеткіштерді және өнеркәсіптік пайдалану жағдайындағы шикізат компоненттерінің есепке алынбаған шығындарын анықтау сияқты сұрақтардың шешімін табуға көмектеседі.

**Түйін сөздер:** ерітінділеу үрдісі, математикалық модель, факторлар, тотыққан мырыш кені, бөліп алу, оңтайландыру.

SUMMARY

Determination of optimal characteristics of zinc sulphuric-acid leaching is coming from in-depth study of process, application of modern research methods and electronic systems of information processing. In this research raw material is hard-dressing oxidized zinc ore containing zinc, lead, copper, iron, calcium, magnesium, aluminum, manganese and silicon. Paper observes the mathematical model of zinc sulphuric-acid leaching from the hard-dressing oxidized zinc ore. Obtained theoretical models permit exactly enough describe flowing processes and admit extrapolation to places of the factor space where direct observation of these processes is impossible. Statistical data processing models are notable for hard link of experimental design and regression equation in the shape of polynomial. Derived model affords to determine consumption of various factors as concentration of sulphuric acid, duration and temperature of leaching, and to optimize process of zinc sulphuric-acid leaching from the hard-dressing oxidized zinc ore. Mathematical model can be used in the design of new hydrometallurgical systems and to analyze working of efficient hydrometallurgical systems, and also for solution of problems as setting of expendable raw material rates, technological parameters and determination of unknown losses of raw material's components under industrial field conditions.

**Key words:** leaching, mathematical model, process factors, oxidized zinc ore, recovery, optimization.

Поступила 25.05.2016