

4. Селиванов Е.Н., Гуляева Р.И., Нечвоглов О.В. и др. // *Металлы*. 2009. № 2. С. 8.
5. Клементьев В.В., Пименов Л.И., Григорьева В.Н. // *Цв. металлы*. 1978. № 9. С. 22.
6. Asaki A., Hajika K., Kondo Y. // *Metall. Mater. Trans. B*. 1984. Vol. 15, № 1. P. 127.
7. Power diffraction files, №: 00 — 030 — 0863, 01 — 078 — 4793, 01 — 078 — 4374, 01 — 070 — 2509, 01 — 081 — 1841.
8. Удоева Л.Ю., Гуляева Р.И., Селиванов Е.Н. и др. // *Тр. X Междунар. симп. «Упорядочение в металлах и сплавах»* (Ростов-на-Дону — п. Лоо, 21—14 сент. 2007 г.). Ростов-на-Дону: ИПО ПИ ЮФУ, 2007. Т. 2. С. 181.
9. Морозов И.С. Применение хлора в металлургии редких и цветных металлов. М.: Наука, 1966.
10. Диаграммы плавкости солевых систем. Ч. 1: Справочник / Под ред. В.И. Посыпайко, Е.А. Алексеевой. М.: *Металлургия*, 1977.
11. Пименов Л.И., Резник И.Д. // *Уфалей — родина российского никеля*. Челябинск: Книга, 1993. С. 197.
12. Ванюков А.В., Уткин Н.И. Комплексная переработка медного и никелевого сырья. Челябинск: *Металлургия*, 1988.
13. Roine A. Outokumpu HSC Chemistru for Windows. Chemical reactions and Equilibrium software with extensive thermochemical database. Pori: Outokumpu research OY, 2002.
14. Клементьев В.В., Пименов Л.И., Коныгин В.П. и др. // *Уфалей — родина российского никеля*. Челябинск: Книга, 1993. С. 181.

УДК 669.21/.23.054.85

АЗОТНО-КИСЛОТНОЕ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЕ ПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПРОМПРОДУКТОВ ОБОГАЩЕНИЯ

© 2013 г. Д.А. Рогожников, С.В. Мамяченков, С.В. Карелов, О.С. Анисимова

Уральский федеральный университет (УрФУ)
им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург

Проведены исследования по азотно-кислотному выщелачиванию полиметаллических промпродуктов с целью максимального извлечения меди и цинка в раствор. При помощи методов математического планирования эксперимента определены оптимальные параметры процесса: соотношение Ж : Т = 5, расход азотной кислоты – 80 см³ на 20 г навески, продолжительность процесса – 120 мин.

Ключевые слова: азотно-кислотное выщелачивание, коллективный промпродукт, математическое планирование эксперимента.

Investigations concerning nitric acid leaching of polymetallic middlings for the purpose of maximum copper and zinc recovery into solution have been carried out. The optimal process parameters: L : S = 5, nitric acid consumption of 80 cm³ per 20 g weighted quantity, and process duration of 120 min were determined using the methods of mathematical design of the experiment.

Key words: nitric acid leaching, collective middlings, mathematical design of experiment.

В последнее время предприятия горно-металлургического комплекса все чаще обращают внимание на ранее уже использованные источники сырья для своего производства. Это может быть связано как с обеднением перерабатываемого рудного сырья, так и с уменьшением запасов полезных ископаемых, так и

Рогожников Д.А. – инженер кафедры металлургии тяжелых цветных металлов УрФУ (620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19). Тел.: (343) 375-95-71. E-mail: d.rogozhnikov87@yandex.ru.

Мамяченков С.В. – докт. техн. наук, вед. науч. сотр., профессор той же кафедры. Тел.: (343) 375-95-71. E-mail: svmatyachenkov@yandex.ru.

Карелов С.В. – докт. техн. наук, зам. проректора по науке, нач. науч.-иссл. части УрФУ, профессор той же кафедры. Тел.: (343) 374-36-31. E-mail: ksv@nich.ustu.ru.

Анисимова О.С. – канд. техн. наук, доцент, ст. науч. сотр. той же кафедры.

со значительным скоплением различных отвальных хвостов и промпродуктов традиционных технологических схем получения цветных металлов, что влечет за собой затраты на их хранение и утилизацию. Последнее, разумеется, не может не оказывать негативного влияния на экологическую обстановку вокруг предприятия, а зачастую, и в регионе в целом [1].

Одним из уязвимых мест горнодобывающих предприятий в настоящее время остается вынужденный вывод из цепочки обогащения трудно-вскрываемых коллективных промпродуктов, практически неподдающихся традиционным способам флотоселекции [2].

В этой связи целью работы являлась разработка новых технологических методов переработки подобного вида сырья, улучшающих экономические показатели предприятий и отвечающих современным экологическим требованиям.

На кафедре МТЦМ Уральского федерального университета были проведены исследования с целью разработки гидрометаллургического способа вскрытия полиметаллических промпродуктов, образующихся на ряде отечественных и зарубежных предприятий.

В основе разрабатываемого метода лежит азотно-кислотное выщелачивание медно-цинкового сырья с последующим селективным постадийным извлечением ценных компонентов.

Была проведена серия опытов по выщелачиванию коллективных промпродуктов состава, %: 6,1 Cu; 8,7 Zn; 28,8 Fe; 1,1 Pb; 11,5 г/т Au; 81 г/т Ag. Анализы растворов и твердых продуктов выполнены методами атомно-абсорбционной и рентгенофлуоресцентной спектроскопии.

Для достижения оптимальных показателей ведения технологического процесса применили метод математического планирования эксперимента в виде трехуровневой модели по трем независимым параметрам.

Полученные результаты опытов были обработаны в компьютерной программе «Statistica 7.0» в виде поверхностей отклика (рис. 1–3), где результирующими функциями являлись значения извлечений меди, цинка и железа в раствор (Y_{Cu} , Y_{Zn} , Y_{Fe}). По технологическим соображениям переменными параметрами были выбраны следующие факторы: отношение жидкого к твердому (Ж : Т) в пульпе (X_1), которое изменяли в пределах от 5 до 9; расход азотной кислоты (X_2) — 60–100 см³ при различном объеме воды (40–120 см³) на 20 г концентрата; про-

должительность выщелачивания (X_3) — от 60 до 180 мин. Перемешивание пульпы во всех опытах осуществляли при помощи магнитной мешалки со скоростью 500 об/мин. Поскольку взаимодействие сульфидного сырья с азотной кислотой сопровождается мгновенным выделением тепла протекающих экзотермических реакций, то температуру процесса в качестве регулируемого фактора не учитывали.

Для каждой поверхности были вычислены значения коэффициентов множественной корреляции R , выведены уравнения регрессии с целью выявления адекватности полученных результатов и определения наиболее значимых параметров процесса [3, 4].

Увеличение плотности пульпы (на рис. 1 представлена поверхность отклика при Ж : Т = 5 для меди, аналогичные данные получены для цинка и железа) позволяет быстрее достигать высоких показателей извлечения металлов в раствор, при этом такие результаты получают уже при стехиометрическом расходе азотной кислоты, тогда как при Ж : Т ≥ 7 необходимы избыток выщелачивающего реагента и большая продолжительность процесса.

Вычисленные значения коэффициентов множественной корреляции R свидетельствуют об адекватности полученных моделей, а выведенные уравнения регрессии показывают, что из критериальных параметров наибольшее влияние на зависимые переменные уравнений оказывает расход азотной кислоты.

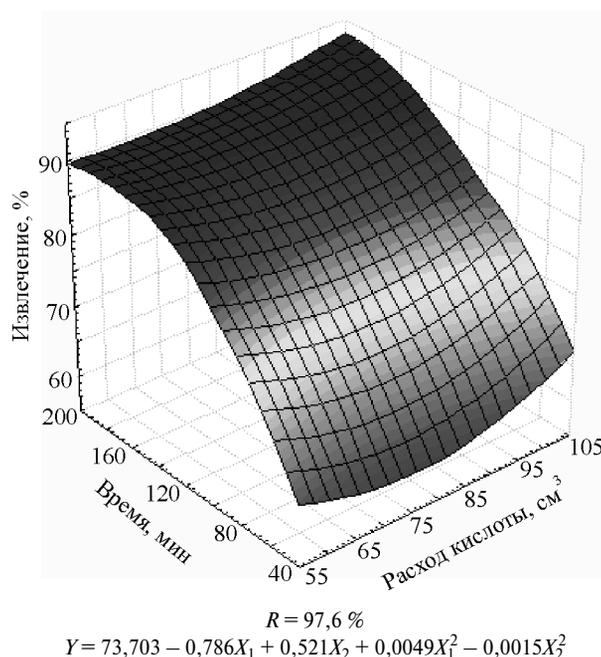
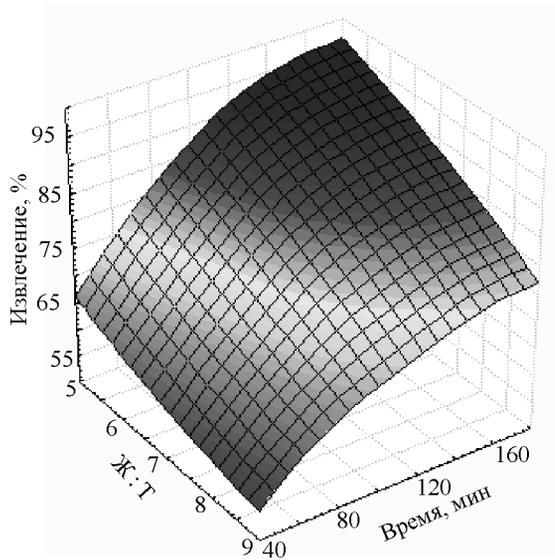


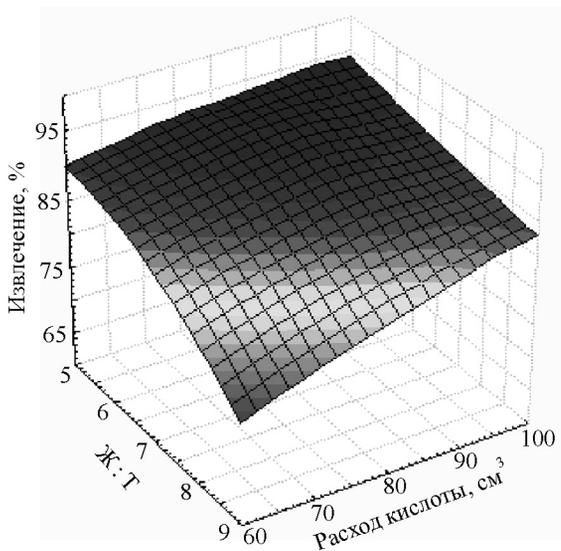
Рис. 1. Зависимость извлечения меди от времени и расхода кислоты при Ж : Т = 5



$$R = 99,3 \%$$

$$Y = 54,761 - 0,657X_1 + 0,595X_2 - 0,014X_1X_2 - 0,141X_1^2 - 0,0014X_2^2$$

Рис. 2. Зависимость извлечения цинка от времени и отношения Ж : Т при расходе кислоты 80 см³



$$R = 93,6 \%$$

$$Y = 182,115 - 4,792X_1 - 1,245X_2 + 0,121X_1X_2 - 0,551X_1^2 - 0,0031X_2^2$$

Рис. 3. Зависимость извлечения железа от расхода кислоты и отношения Ж : Т при продолжительности процесса 120 мин

При недостатке кислоты поверхности приобретают вогнутый вид, что связано с уменьшением окислительного потенциала системы. Нехватка выщелачивающего агента приводит к образованию поверхностных пленок, затрудняющих доступ окислителя к непрореагировавшим частицам, —

возникают внутридиффузионные ограничения. Однако уже при стехиометрическом расходе кислоты (80 см³) происходит существенное повышение окислительного потенциала системы, о чем свидетельствуют выпуклые формы поверхностей (см. рис. 2, аналогичные данные получены для меди и железа). В результате, ограничив расход азотной кислоты, удастся достичь высоких показателей выщелачивания при меньшем времени процесса.

Значения коэффициентов *R* свидетельствуют о правильности подбора параметров и интервалов их варьирования. По результатам регрессионного анализа наибольшее влияние на переход металлов в раствор, в зависимости от условий проведения эксперимента, оказывают плотность пульпы или продолжительность процесса.

Поверхности отклика, полученные при различных фиксированных значениях продолжительности процесса, показывают, что 60 мин оказывается недостаточно для достижения высокого извлечения металлов в раствор. Это связано с кинетическими затруднениями, т.е. нехваткой времени на осуществление взаимодействия окислителя и выщелачиваемого сырья.

Однако при длительности протекания процесса 120 мин (см. рис. 3) удастся достичь высоких показателей извлечения металлов в раствор при стехиометрическом расходе азотной кислоты.

Снижение коэффициентов множественной корреляции для меди и цинка говорит о том, что увеличение времени процесса до 180 мин негативно сказывается на конечных показателях выщелачивания, что также видно из уравнений регрессии.

Полученные результаты математического планирования эксперимента в виде полных полиномов позволяют оценить вклад каждого фактора в эффективность процесса выщелачивания:

$$R_{Cu} = 0,915,$$

$$Y_{Cu} = 119,83 - 11,185X_1 - 1,146X_2 + 0,623X_3 - 0,096X_1^2 + 0,004X_2^2 - 0,001X_3^2 + 0,119X_1X_2 + 0,250X_1X_3 - 0,029X_1X_3;$$

$$R_{Zn} = 0,967,$$

$$Y_{Zn} = 101,545 - 6,286X_1 - 0,785X_2 + 0,565X_3 + 0,005X_2^2 - 0,001X_3^2 + 0,041X_1X_2 - 0,001X_2X_3 - 0,18X_1X_3;$$

$$R_{Fe} = 0,948,$$

$$Y_{Fe} = 146,534 - 7,106X_1 - 1,243X_2 + 0,208X_3 - 0,405X_1^2 + 0,003X_2^2 + 0,12X_1X_2 + 0,015X_1X_3.$$

Все коэффициенты приведенных полиномов оказываются значимыми, полученные значения коэффициентов R свидетельствуют об адекватности моделей.

Адекватность уравнений подтверждена с помощью критерия Фишера.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При помощи математического планирования эксперимента были подобраны оптимальные параметры ведения процесса азотно-кислотного выщелачивания коллективных промпродуктов, при которых можно обеспечить максимальное извлечение меди и цинка в раствор.

Анализ поверхностей отклика и математических моделей показал, что таковыми параметрами явля-

ются: соотношение $J : T = 5$, расход кислоты 80 см^3 на навеску промпродукта 20 г, продолжительность эксперимента 120 минут.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Кляйн С.Э., Карелов С.В., Деев В.И.* Цветная металлургия. Окружающая среда. Экономика. Екатеринбург: УГТУ—УПИ, 2000.
2. *Беликов В.В.* // Обогащение руд. 1994. № 3. С. 22.
3. *Иванов В.М.* Теория вероятностей и математическая статистика: Учеб. пос. Екатеринбург: Изд-во УрГЭУ, 2001.
4. *Шмойлова Р.А., Гусынин А.Б., Минашкин В.Г.* и др. Практикум по теории статистики: Учеб. пос. / Под ред. Р.А. Шмойловой. М.: Финансы и статистика, 2001.

УДК 669.2/83 : 66.046.

МОДЕЛИРОВАНИЕ КИНЕТИКИ АВТОКЛАВНОГО РАСТВОРЕНИЯ СУЛЬФИДОВ МЕДИ И НИКЕЛЯ В ПРИСУТСТВИИ КИСЛОРОДА

© 2013 г. С.В. Книсс, С.С. Набойченко, В.П. Жуков

Уральский федеральный университет (УрФУ)
им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург

В контролируемых условиях эксперимента исследованы кинетические закономерности окислительного автоклавного растворения сульфидов железа, меди и никеля в процессе выщелачивания руды месторождения «Шануч». Показано, что скорость растворения сульфидов лимитируется абсорбцией кислорода.

Ключевые слова: сульфиды меди и никеля, абсорбция кислорода, выщелачивание.

The kinetic regularities of oxidizing autoclave dissolution of iron, copper and nickel sulfides in the course of the «Shanuch» deposit ore leaching have been examined in the controllable conditions of experiment. The sulfide dissolution rate is shown to be limited by oxygen absorption.

Key words: copper and nickel sulfides, oxygen absorption, leaching.

Ранее [1] на основе данных о средней скорости процесса было выполнено математическое описание кинетики окислительного автоклавного растворения сульфидов железа в процессе выщелачивания

руды месторождения «Шануч» и сформулировано предположение, что общая скорость процесса лимитируется абсорбцией кислорода.

Цель настоящей работы — проверка данно-

Книсс С.В. – ассистент кафедры металлургии тяжелых цветных металлов УрФУ (620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19). Тел.: (343) 375-47-95. E-mail: bt_work@mail.ru.

Набойченко С.С. – докт. техн. наук, проф., чл.-кор. РАН, президент УрФУ, зав. кафедрой металлургии тяжелых цветных металлов УрФУ. Тел.: (343) 375-44-72, 375-47-95. E-mail: mhnfm@mail.ustu.ru; s.a.petrova@ustu.ru.

Жуков В.П. – докт. техн. наук, профессор той же кафедры. E-mail: zhukovv.p@mail.ru.