

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.

го предположения для сульфидов никеля и меди с оценкой скорости процесса через каждые 10 мин (Δt) эксперимента.

Предварительно рассчитывали текущую скорость абсорбции кислорода при растворении сульфидов железа по уравнению

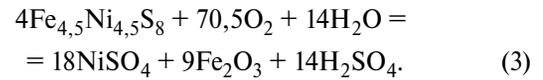
$$v_{Fe} = \frac{(T:Ж) V_{\text{пульпы}} C_{Me} - 1,13 \cdot 0,635 \cdot 9 (D_{O_2} \tau_k)^{0,5} F_{\text{п}} C_{\text{ақ}} / 23}{\Delta t}, \quad (1)$$

где v_{Fe} — скорость абсорбции, моль_{Fe}/мин; 0,635 — стехиометрический коэффициент, учитывающий расход O_2 по соответствующим реакциям; 23 и 9 — общее число молей кислорода и сульфидного железа, согласно стехиометрии реакций; C_{Me} — концентрация металла в растворе, г/дм³; D_{O_2} — коэффициент диффузии кислорода в пульпе; τ_k — время контакта, с; $F_{\text{п}}$ — площадь параболы, м²; $C_{\text{ақ}}$ — количество растворенного кислорода в воде, г/дм³.

В таблице представлены экспериментальные и расчетные данные скорости автоклавного выщелачивания сульфидов железа, полученные в этих условиях. Из таблицы следует, что разница между расчетными и экспериментальными данными изменяется от 3,8 до 20,6 % за 70 мин выщелачивания, когда наблюдается наибольшая скорость процесса.

Принимаем, что лимитирующая стадия абсорбции кислорода справедлива по ходу эксперимента. Для оценки абсорбционных затруднений при растворении сульфидов меди (халькопирит) и никеля (пентландит) использовали обработку кинетических данных методом текущих скоростей с $\Delta t = 10$ мин.

Исходим из того, что растворение сульфидов протекает в соответствии со стехиометрией следующих реакций:



Условия проведения опытов: температура 413—453 К, давление кислорода 0,4 МПа, рН раствора 1, продолжительность процесса 2 ч. Уравнения абсорбции для сульфидов никеля и меди, аналогично (1), имеют вид

$$v_{Ni} = \frac{(T:Ж) V_{\text{пульпы}} C_{Me} - 1,13 \cdot 0,329 \cdot 9 (D_{O_2} \tau_k)^{0,5} F_{\text{п}} C_{\text{ақ}} / 31,75}{\Delta t}, \quad (4)$$

$$v_{Cu} = \frac{(T:Ж) V_{\text{пульпы}} C_{Me} - 1,13 \cdot 0,037 \cdot 1 (D_{O_2} \tau_k)^{0,5} F_{\text{п}} C_{\text{ақ}} / 4}{\Delta t}, \quad (5)$$

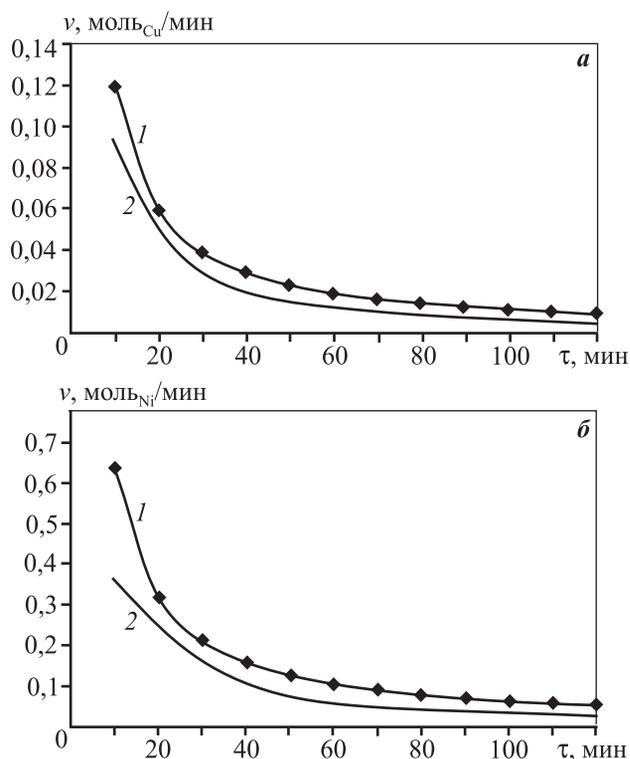
где 0,329 и 0,037 — стехиометрические коэффициенты, учитывающие расход O_2 по соответствующим реакциям; 31,75 и 9 — общее число молей кислорода и сульфидного никеля, 4 и 1 — общее число молей кислорода и сульфидной меди, согласно стехиометрии реакций.

Адекватность моделей (1), (4), (5) экспериментальным данным подтверждена с помощью F -статистики с доверительной вероятностью 95 %.

Экспериментальные и расчетные временные зависимости скорости растворения сульфидов никеля и меди показаны на рисунке. Полученные данные свидетельствуют о том, что по порядку величин v

Экспериментальные и расчетные данные скорости растворения сульфидов железа, моль_{Fe}/мин

$t, ^\circ C$	Время, мин											
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
Экспериментальные данные												
140	2,31	1,16	0,77	0,58	0,46	0,39	0,33	0,29	0,26	0,23	0,21	0,19
150	3,26	1,63	1,09	0,82	0,65	0,54	0,47	0,41	0,36	0,33	0,30	0,27
160	2,37	1,19	0,79	0,59	0,47	0,40	0,34	0,30	0,26	0,24	0,22	0,20
170	3,32	1,66	1,11	0,83	0,66	0,55	0,47	0,42	0,37	0,33	0,30	0,28
180	2,79	1,39	0,93	0,70	0,56	0,46	0,40	0,35	0,31	0,28	0,25	0,23
Расчетные данные												
140	1,84	1,43	1,09	0,80	0,58	0,41	0,30	0,26	0,27	0,35	0,48	0,67
150	2,59	2,01	1,52	1,10	0,76	0,50	0,32	0,22	0,20	0,26	0,40	0,62
160	1,89	1,47	1,11	0,81	0,57	0,39	0,27	0,21	0,21	0,28	0,40	0,58
170	2,64	2,05	1,54	1,10	0,75	0,48	0,29	0,18	0,14	0,19	0,32	0,53
180	2,21	1,71	1,26	0,87	0,54	0,28	0,07	0,08	0,16	0,19	0,16	0,06



Экспериментальные (1) и расчетные (2) данные по скорости растворения сульфидов меди (а) и никеля (б) в зависимости от продолжительности эксперимента

обнаруживается удовлетворительное совпадение. Разница между расчетными и экспериментальными данными составила 4,5—42,2 % при растворении сульфида никеля и 3,5—21,0 % для сульфида меди за 70 мин выщелачивания. Наибольшее расхождение в начальный момент процесса, по-видимому, объясняется заметным протеканием реакций при $\Delta t < 10$ мин.

Дополнительно, используя методологию работы [1], выполнен анализ возможных лимитирующих стадий следующих этапов:

- абсорбция кислорода пульпой;
- массоперенос растворенного газа к поверхности твердых частиц (внешняя диффузия) совместно с растворителем в зону химической реакции;
- химическое взаимодействие на поверхности твердых частиц;
- отвод продуктов реакции в объем раствора.

Получены следующие расчетные значения скоростей для сульфидов железа, никеля и меди, моль/мин: $(1,2 \pm 1,4) \cdot 10^{-7}$ — для 2-го этапа; $(1,1 \pm 1,7) \cdot 10^{-3}$ — для 3-го; $\sim 10^{-6}$ — для 4-го.

Таким образом, полученные значения результатов расчетов скоростей этапов 2—4 намного отличаются от экспериментальных данных таблицы и рисунка, что является дополнительным подтверждением возможного протекания растворения сульфидов железа, никеля и меди в режиме абсорбции кислорода.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В контролируемых условиях эксперимента проведен анализ кинетики автоклавного окислительного растворения сульфидов железа, никеля и меди через каждые 10 мин эксперимента. Сформулировано предположение, что скорость растворения сульфидов металлов контролируется стадией абсорбции кислорода. Для интенсификации выщелачивания представляется целесообразным повышать давление кислорода и интенсивность перемешивания пульпы, определяющие эффективность массообменных процессов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Книсс С.В., Набойченко С.С., Жуков В.П. // Изв. вузов. Цв. металлургия. 2012. № 3. С. 7.