

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ПРОЦЕССА ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ СУЛЬФАТИЗИРОВАННЫХ ОГАРКОВ ОБЖИГА МЕДНО-ЦИНКОВЫХ ПРОМПРОДУКТОВ

© 2017 г. А.М. Паньшин, С.В. Мамяченков, Д.Л. Тропников, О.С. Анисимова, Д.А. Рогожников

ООО «УГМК-Холдинг», г. Верхняя Пышма  
Уральский федеральный университет (УрФУ)  
им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург  
ОАО «Святогор», г. Красноуральск

*Статья поступила в редакцию 12.12.16 г., подписана в печать 09.03.17 г.*

Представлены результаты анализа термодинамических характеристик и исследования кинетических закономерностей процесса выщелачивания нового вида сульфатизированных медно-цинковых промпродуктов, получаемых при выводе сульфидных материалов, не поддающихся эффективной селективной флотации. При анализе кинетических кривых установлено, что при любой концентрации кислоты в диапазоне 0–20 г/дм<sup>3</sup> скорость реакции резко отличается в начальный момент времени (30 мин) и последующий период. В первоначальный момент скорость контролируется только внешней диффузией, а по истечении 30 мин процесса начинают проявляться кинетические затруднения. Определены порядки реакций выщелачивания огарка: 1,0±0,1 по меди, 0,87±0,1 по цинку, 0,56±0,1 по железу. Результаты расчета кажущейся константы скорости реакции выщелачивания показали слабую зависимость ее от температуры, что хорошо коррелирует с данными термодинамического анализа.

**Ключевые слова:** сульфатизированный медно-цинковый промпродукт, серно-кислотное выщелачивание, термодинамические характеристики, кинетика.

**Паньшин А.М.** — докт. техн. наук, техн. директор ООО «УГМК-Холдинг» (624091, Свердловская обл., г. Верхняя Пышма, Успенский пр-т, 1). E-mail: info@ugmk.com.

**Мамяченков С.В.** — докт. техн. наук, профессор кафедры металлургии тяжелых цветных металлов (МТЦМ) УрФУ (620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19). E-mail: svmamychenkov@yandex.ru.

**Тропников Д.Л.** — директор ОАО «Святогор» (624330, Свердловская обл., г. Красноуральск, ул. Кирова, 2). E-mail: tdl@svg.ru.

**Анисимова О.С.** — канд. техн. наук, доцент кафедры МТЦМ УрФУ. E-mail: osanis@mail.ru.

**Рогожников Д.А.** — канд. техн. наук, доцент кафедры МТЦМ УрФУ. E-mail: darogozhnikov@yandex.ru.

**Для цитирования:** Паньшин А.М., Мамяченков С.В., Тропников Д.Л., Анисимова О.С., Рогожников Д.А. Исследование закономерностей процесса выщелачивания сульфатизированных огарков обжига медно-цинковых промпродуктов // Изв. вузов. Цвет. металлургия. 2017. No. 3. С. 23–30. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2017-3-23-30.

*Panshin A.M., Mamyachenkov S.V., Tropnikov D.L., Anisimova O.S., Rogozhnikov D.A.*

### **Research of regularities of leaching the sulfated cinders obtained during roasting of copper-zinc middlings**

The paper presents results obtained in the analysis of thermodynamic properties and research findings on kinetic regularities of the leaching process of a new type of sulfated copper-zinc middlings formed when removing sulfide materials which cannot be effectively filtered out by flotation. Analysis of kinetic curves shows that for any acid concentration in the range of 0–20 g/dm<sup>3</sup>, the reaction rate at the start time (30 min) differs markedly from the subsequent period. At the start time the rate is controlled only by external diffusion, and after 30 minutes of the process time the kinetic hindrances begin to occur. The paper determines the order of cinder leaching reactions: 1,0±0,1 for copper, 0,87±0,1 for zinc, 0,56±0,1 for iron. The results of calculating the apparent leaching reaction rate constant showed its weak temperature dependence, which correlates well with thermodynamic analysis data.

**Keywords:** sulfated copper-zinc middlings, sulfuric acid leaching, thermodynamic properties, kinetics.

**Panshin A.M.** — Dr. Sci. (Tech.), technical director of LLC «UMMC-Holding» (624091, Russia, Sverdlovsk region, Pyshma, Uspenskii av., 1). E-mail: info@ugmk.com.

**Mamyachenkov S.V.** — Dr. Sci. (Tech.), prof., Department of metallurgy of heavy non-ferrous metals (MHNFM), Ural Federal University (UrFU) (620002, Russia, Yekaterinburg, Mira str., 19). E-mail: svmamychenkov@yandex.ru.

**Tropnikov D.L.** — director of JCS «Svyatogor» (624330, Russia, Sverdlovsk region, Krasnoural'sk, Kirov str., 2). E-mail: tdl@svg.ru.

**Anisimova O.S.** — Cand. Sci. (Tech.), associate prof., Department of MHNFM, UrFU. E-mail: osanis@mail.ru.

**Rogozhnikov D.A.** — Cand. Sci. (Tech.), associate prof., Department of MHNFM, UrFU. E-mail: darogozhnikov@yandex.ru.

**Citation:** Panshin A.M., Mamyachenkov S.V., Tropnikov D.L., Anisimova O.S., Rogozhnikov D.A. Issledovanie zakonome-rostey protsessa vyshchelachivaniya sul'fatizirovannykh ogarkov obzhiga medno-tsinkovykh promproduktov. *Izv. vuzov. Tsvet. metallurgiya*. 2017. No. 3. P. 23–30. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2017-3-23-30.

## Введение

Традиционные методы флотоселекции при переработке трудновскрываемого полиметаллического сырья не обеспечивают достаточную степень разделения и количественное извлечение сульфидов цветных металлов, что сопровождается значительными потерями ценных компонентов — до 35 % Cu, до 40 % Zn, до 50 % Pb, до 50 % редких и благородных металлов [1, 2]. При этом качество полученных концентратов зачастую не соответствует требованиям, предъявляемым к ним на последующих стадиях металлургической переработки [3, 4].

Для обеспечения высоких показателей процесса при разделении коллективных концентратов на медные и цинковые (свинцовые) применяют способы вывода из цепочки обогащения, в определенных узлах технологической схемы, небольших объемов коллективных промпродуктов, представляющих собой сложные сульфидные соединения, не разделяемые флотацией. Неоднократные попытки вовлечь подобные отходы в цикл металлургического производства успеха не имели, так как низкое содержание ценных компонентов в подобном сырье не позволяет перерабатывать его традиционными способами по экономическим соображениям.

Одним из перспективных направлений переработки сульфидных промпродуктов обогащения является комбинированная технология, включающая пирометаллургическую подготовку сырья (обжиг), выщелачивание получаемого огарка и извлечение цветных металлов из раствора гидрометаллургическими методами [5–8].

Для перевода извлекаемых металлов в водорастворимые сульфаты, а железа — в нерастворимые в воде оксиды используют сульфатизирующий обжиг. Формирование устойчивых сульфатов при этом происходит через стадию образования оксидов, которые могут существовать только после окисления основной части сульфидов до сложных оксосульфатных фаз [9, 10].

Выщелачивание такого огарка позволяет отделить в виде твердого остатка большую часть присутствующего в исходном сырье железа, а из раствора — выделить цветные металлы или их соединения.

В данной работе исследовали выщелачивание огарка (%: 6,73 Cu, 15,84 Zn, 31,1 S, 34,32 Fe, 0,29 Pb, 1,3 г/т Au, 79,4 г/т Ag), полученного в результа-

те сульфатизирующего обжига (560 °С, 2 ч) полиметаллического сульфидного медно-цинкового промпродукта.

## Термодинамические расчеты

По результатам рентгенофазового анализа идентифицированы основные фазы, присутствующие в промпродукте, представляющие собой оксиды, сульфаты, смешанные оксосульфатные

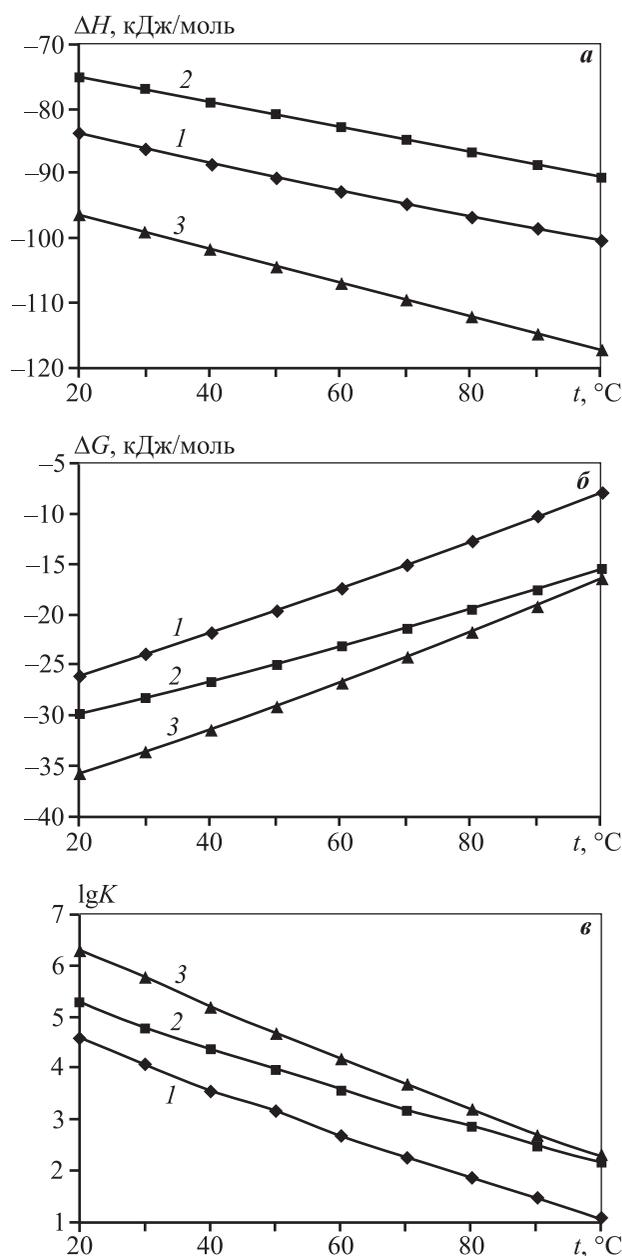
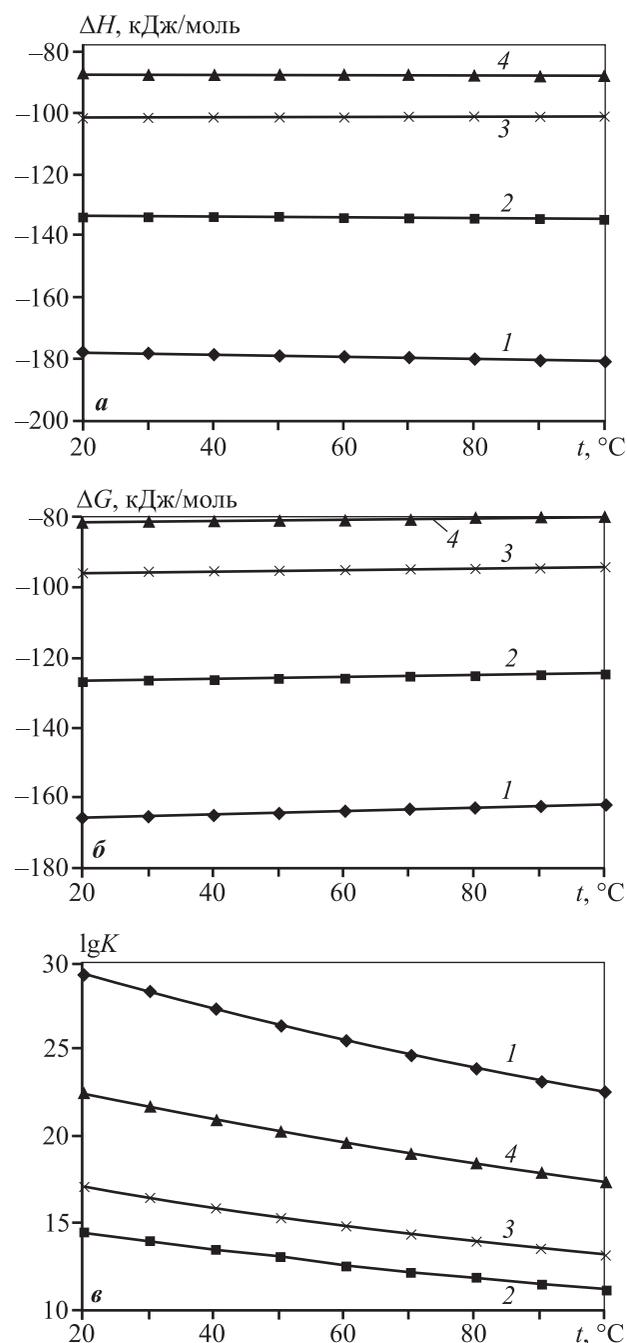


Рис. 1. Изменение энтальпии, энергии Гиббса и логарифма константы равновесия при повышении температуры для реакций гидратации сульфатов 1 – FeSO<sub>4</sub>, 2 – CuSO<sub>4</sub>, 3 – ZnSO<sub>4</sub>

соединения и ферриты меди и цинка. Термодинамические характеристики, рассчитанные в среде HSC-6 для основных фаз, присутствующих в промпродукте, представлены на рис. 1–3.

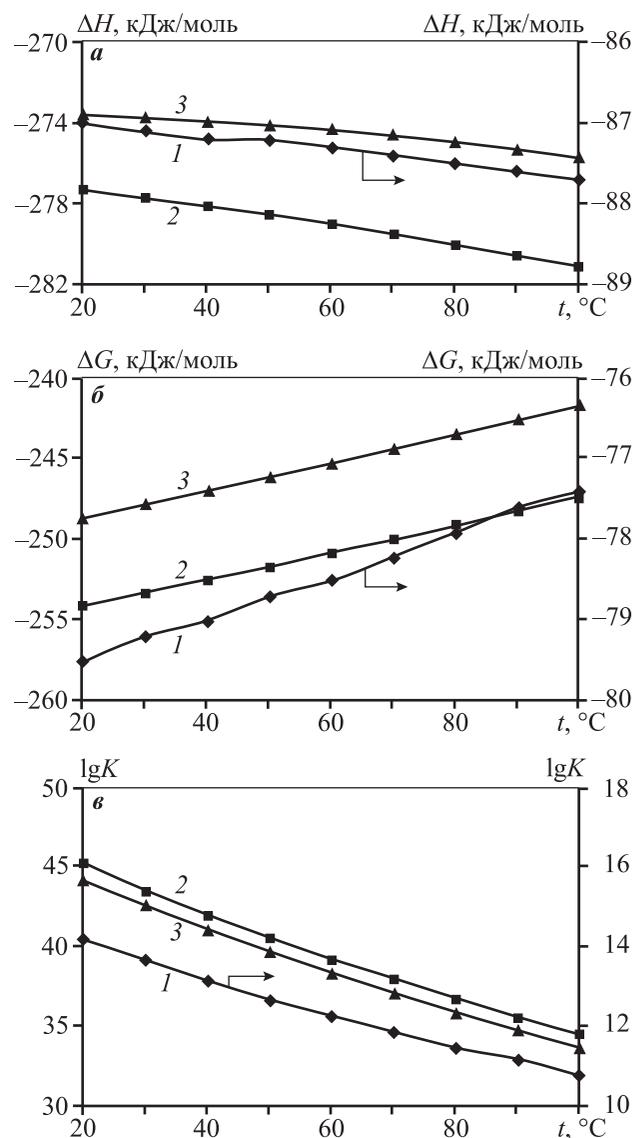
Первая группа функций (рис. 1) характеризует изменение энтальпии ( $\Delta H$ ), свободной энергии Гиббса ( $\Delta G$ ) и логарифма константы равновесия



**Рис. 2.** Термодинамические характеристики реакций взаимодействия оксидов меди, цинка и железа с серной кислотой  
1 –  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , 2 –  $\text{FeO}$ , 3 –  $\text{ZnO}$ , 4 –  $\text{CuO}$

( $\lg K$ ) при повышении температуры для реакций гидратации безводных сульфатов меди, цинка и железа. Результатом этих реакций является формирование кристаллогидратов соответствующих солей:  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ . Все три реакции экзотермические ( $\Delta H < 0$ ), следовательно, увеличение температуры вызывает уменьшение константы равновесия, т.е. в соответствии с принципом Ле-Шателье происходит смещение равновесия в этих системах в сторону обратной реакции.

Аналогично рассчитаны термодинамические характеристики реакций взаимодействия оксидов меди, цинка и железа с серной кислотой (рис. 2). Результатом взаимодействия является образование



**Рис. 3.** Термодинамические характеристики реакций взаимодействия  $\text{CuO} \cdot \text{CuSO}_4$  (1),  $\text{CuO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$  (2),  $\text{ZnO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$  (3) с серной кислотой

растворимых сульфатов соответствующих металлов в кислой среде. В этой группе реакций повторяется тенденция изменения значений функций с ростом температуры: все реакции экзотермические, при повышении температуры происходит закономерное уменьшение  $\lg K$ .

Следующая группа реакций описывает взаимодействие сложных фаз (смешанного оксида-сульфата меди  $\text{CuO} \cdot \text{CuSO}_4$ , ферритов меди и цинка  $\text{CuO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZnO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ ) с серной кислотой (рис. 3). В результате реакции в растворе присутствуют сульфаты меди, цинка и железа (III). Изменение энтальпии, энергии Гиббса и логарифма константы равновесия при повышении температуры подтверждает общую закономерность для экзотермических реакций ( $\Delta H < 0$ ): увеличение температуры негативно сказывается на равновесии в этих системах, происходит его смещение в сторону обратных реакций, константы равновесия линейно уменьшаются.

Таким образом, анализ изменения термодинамических функций с ростом температуры в системе «обоженный промпродукт—вода—серная кислота» показал, что повышение температуры при выщелачивании объекта такого состава нецелесообразно.

### Экспериментальная часть

Кинетические опыты проводили при следующих условиях: отношение жидкого к твердому (Ж : Т) в пульпе — 5 : 1; концентрация серной кислоты — от 0 до 20 г/дм<sup>3</sup>, температура процесса — от 25 до 80 °С, продолжительность выщелачивания — от 30 до 90 мин. В ходе эксперимента продуктивные растворы и полученные промводы анализировали с помощью атомно-абсорбционного спектрометра «Analitik Jena novAA 300» (Германия).

Из аналитических данных получена зависимость степени извлечения меди, цинка и железа от концентрации серной кислоты (рис. 4). В водном растворе ( $C_{\text{H}_2\text{SO}_4} = 0$ ) максимальное извлечение достигается по сульфату меди, минимальное — по сульфату железа, что соответствует растворимости гидратированных сульфатов в воде. На этой стадии происходит предварительное образование кристаллогидратов из безводных сульфатов, т.е. скорость процесса лимитируется гидратацией ионов меди, цинка и железа.

При увеличении концентрации кислоты до 10 г/дм<sup>3</sup> реакция протекает без затруднений для

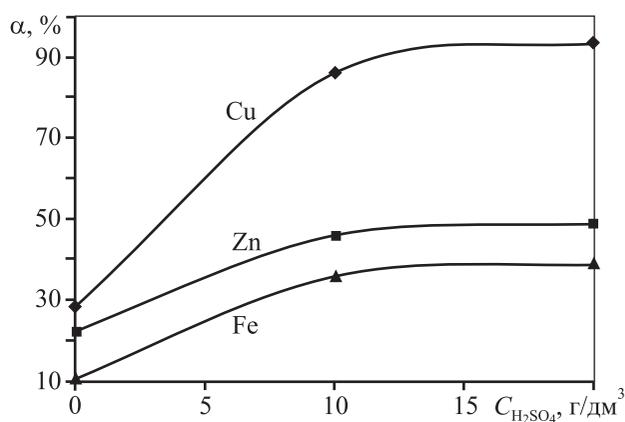


Рис. 4. Зависимость извлечения металлов в раствор от концентрации серной кислоты (50 °С, 90 мин)

соединений меди и цинка. Оксидные формы железа в этом случае извлекаются лишь на 40 %.

Повышение концентрации  $\text{H}_2\text{SO}_4$  до 20 г/дм<sup>3</sup> практически не влияет на степень извлечения компонентов. Вероятно, при температуре опыта (50 °С) для вскрытия упорных железооксидных и ферритных фаз такой концентрации кислоты недостаточно [11, 12]: окислительно-восстановительный потенциал  $\text{H}_2\text{SO}_4$  при концентрации 0,2 М (20 г/дм<sup>3</sup>) составляет  $-0,69$  В (расчет по уравнению Нернста). С другой стороны, из анализа зависимости термодинамических функций этой системы от температуры известно, что все реакции взаимодействия фаз с серной кислотой являются экзотермическими и увеличение температуры нецелесообразно.

С точки зрения последующей очистки растворов от железа, эта операция будет тем эффективнее, чем меньше концентрация железа. Поэтому, вероятно, не следует повышать концентрацию кислоты выше 10 г/дм<sup>3</sup>, с тем чтобы не увеличивать извлечение железа.

Для определения кинетических параметров процесса выщелачивания обоженного промпродукта, а именно скоростей и порядков реакций, получены зависимости извлечения компонентов от продолжительности реакций при различных концентрациях кислоты (0, 10 и 20 г/дм<sup>3</sup>) при Ж : Т = 5 : 1 и  $t = 50$  °С. Результаты эксперимента представлены на рис. 5.

При  $C_{\text{H}_2\text{SO}_4} = 0$  г/дм<sup>3</sup> (водное выщелачивание, см. рис. 5, а) на кривых выделяется буферная зона продолжительностью от 30 до 60 мин процесса, связанная с гидратацией безводных сульфатов меди и цинка. Только после окончания этой стадии

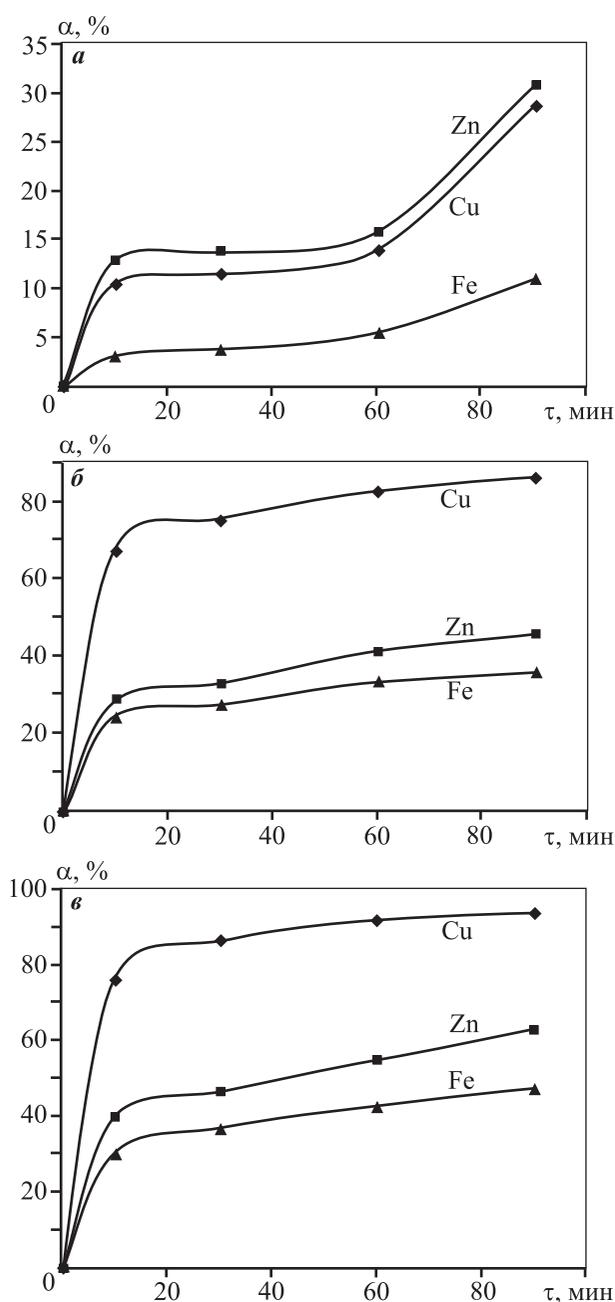


Рис. 5. Зависимости извлечения металлов в раствор от продолжительности выщелачивания при различной концентрации серной кислоты  $H_2SO_4$ , г/дм<sup>3</sup> – 0 (а), 10 (б), 20 (в)

можно наблюдать повышение извлечения компонентов.

При концентрации кислоты 10 и 20 г/дм<sup>3</sup> кинетические кривые имеют характерный вид, соответствующий высокому извлечению в начальный период времени и существенному торможению на финальном этапе. Из полученных данных следует, что начальная скорость реакции остается доста-

Таблица 1  
Значения средних скоростей выщелачивания ( $W$ , мин<sup>-1</sup>) компонентов в начальный период времени (до 30 мин)

$C_{H_2SO_4}$ , г/дм <sup>3</sup>	$W_{Cu}$	$W_{Zn}$	$W_{Fe}$
0	0,0025	0,0021	0,0008
10	0,0246	0,0112	0,0096
20	0,0291	0,0163	0,0123

точно высокой в начальный период времени (до 30 мин), что обусловлено, предположительно, совместным растворением сульфатных и оксидных фаз. На этой стадии процесса вероятен диффузионный режим.

Значения средних скоростей в начальный момент времени находили по кинетическим кривым (см. рис. 5) численным дифференцированием. Результаты приведены в табл. 1.

При более высоких степенях извлечения кинетическая кривая выходит на плато, а скорости выщелачивания резко снижаются для всех компонентов. Можно предположить, что это обусловлено более сложным и медленным выщелачиванием ферритов меди и цинка. Резкое уменьшение скорости должно быть связано, при прочих равных условиях, с изменением природы лимитирующей стадии, а именно переходом режима из диффузионного в кинетический.

Следует отметить, что оба участка кинетической кривой, соответствующие продолжительностям выщелачивания до 30 мин и 30–90 мин, практически линейны, т.е. процесс протекает в данных промежутках времени с постоянной скоростью.

Частный порядок реакции по  $i$ -му компоненту ( $n_i$ ) можно найти по методу Вант-Гоффа [13] по формуле

$$n_i = \frac{\ln W_2}{W_1} \bigg/ \frac{\ln C_{i2}}{C_{i1}} \quad (1)$$

или построением логарифмической зависимости по уравнению

$$\ln W = \ln K + n_i \ln C_i, \quad (2)$$

где  $C_{i1}$ ,  $C_{i2}$  — концентрации компонента в момент времени 1 и 2;  $W_1$ ,  $W_2$  — скорость выщелачивания в моменты времени 1 и 2;  $n_i$  — частный порядок реакции по компоненту.

Для определения кинетических зависимостей применяли графический способ, основанный на

уравнении (2). Построение зависимости в координатах « $\ln C_i - \ln W$ » можно заменить зависимостью « $\lg C_i - \lg(d\alpha/d\tau)$ », где  $\alpha$  — степень извлечения компонента в раствор,  $d\alpha/d\tau$  — производная, найденная по кривой численным или графическим способами.

Графическим методом (рис. 6) находим, что в начальный период выщелачивания продолжительностью до 30 мин порядок реакции для извлечения меди равен  $1,0 \pm 0,1$ , для цинка  $0,87 \pm 0,1$ , для железа  $0,56 \pm 0,1$  (тангенс линейной функции рассчитывали по известной методике [14]).

Выход кинетической кривой извлечения компонента на плато после 30 мин выщелачивания (см. рис. 5) предполагает изменение механизма процесса, а следовательно, требует иного подхода к обработке экспериментальных результатов.

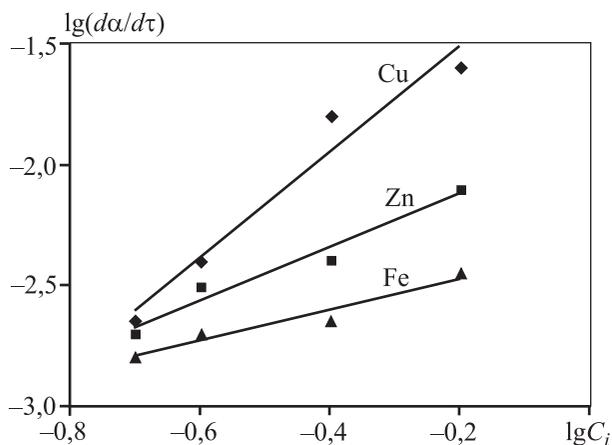


Рис. 6. Логарифмические зависимости порядка реакции для  $i$ -го компонента при  $\tau < 30$  мин для меди, цинка и железа

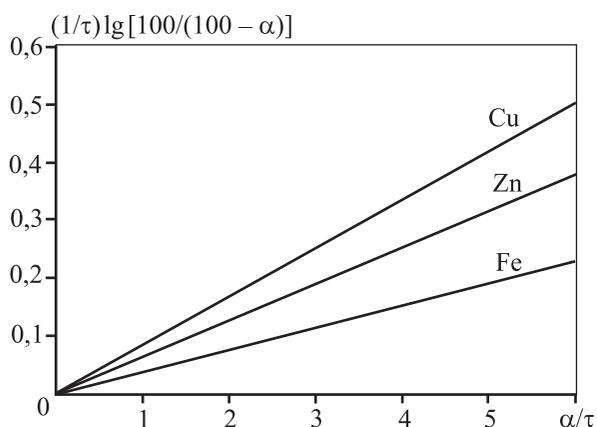


Рис. 7. Графическое определение кажущейся константы скорости выщелачивания компонентов промпродукта в период 30–60 мин

Вид кривой позволяет отнести процесс к типу реакций, протекающих в заданных условиях с самоторможением вследствие недостатка растворителя (или его концентрации), многокомпонентности системы, различной растворимости фаз, составляющих промпродукт. Известно, что подобные процессы хорошо описываются видоизмененным кинетическим уравнением [15], выведенным для процессов, идущих с самоторможением:

$$\frac{1}{\tau} = \lg \frac{100}{100 - \alpha} - \beta \frac{\alpha}{\tau} = k, \quad (3)$$

где  $\tau$  — время взаимодействия, мин;  $\beta$  — коэффициент самоторможения, доли ед.;  $\alpha$  — коэффициент извлечения, %;  $k$  — кажущаяся константа скорости,  $\text{мин}^{-1}$ .

По полученным данным построены графики, характеризующие переход ионов меди, цинка и железа в раствор. Для получения прямолинейной зависимости графики строились в координатах « $\frac{\alpha}{\tau} - \frac{1}{\tau} \lg \frac{100}{100 - \alpha}$ ».

На рис. 7 приведены графики, построенные для ионов меди, цинка и железа при концентрации кислоты  $20 \text{ г/дм}^3$ . Точки, соответствующие экспериментальным данным, хорошо ложатся на прямые линии. Прямые исходят из одной точки на оси ординат ( $\beta = 0,005$ ). Значение ординаты определяет коэффициент самоторможения. Кажущуюся константу скорости находили по тангенсу угла наклона прямых к оси абсцисс.

Из результатов, приведенных в табл. 2, следует, что при повышении температуры от  $50$  до  $80 \text{ }^\circ\text{C}$  кажущаяся константа скорости практически не изменяется, коэффициент торможения одинаков для ионов меди, цинка и железа. Это свидетельствует о том, что в исследованном диапазоне температур и концентраций кислоты сочетание  $t = 80 \text{ }^\circ\text{C}$  и  $C_{\text{H}_2\text{SO}_4} = 20 \text{ г/дм}^3$  оказывает тормозящее действие на скорость растворения.

Таблица 2  
Результаты расчета коэффициента самоторможения ( $\beta$ ) и кажущейся константы скорости реакции выщелачивания ( $k$ )

Ион	$C_{\text{H}_2\text{SO}_4}, \text{ г/дм}^3$	$\beta$	$k, \text{ мин}^{-1}$		
			$25 \text{ }^\circ\text{C}$	$50 \text{ }^\circ\text{C}$	$80 \text{ }^\circ\text{C}$
$\text{Cu}^{2+}$	0	0,005	0,0015	0,0018	0,0017
$\text{Zn}^{2+}$	10	0,005	0,0014	0,0018	0,0017
$\text{Fe}^{2+}$	20	0,005	0,0012	0,0007	0,0006

## Выводы

1. Расчеты изменения значений энтальпии, свободной энергии Гиббса и константы равновесия от температуры показали, что все реакции, протекающие в системе «обоженный промпродукт—вода—серная кислота», являются экзотермическими ( $\Delta H < 0$ ). Следовательно, повышение температуры смещает равновесие в сторону обратной реакции, константа равновесия при этом уменьшается.

2. При анализе кинетических кривых (зависимости извлечения от продолжительности процесса) установлено, что при любой концентрации кислоты в диапазоне 0—20 г/дм<sup>3</sup> скорость реакции резко отличается в начальный момент времени (30 мин) и в последующий период. Можно предположить изменение природы лимитирующей стадии: если в первоначальный момент скорость контролируется только внешней диффузией, то через 30 мин процесса начинают проявляться кинетические затруднения.

3. Определены порядки реакций выщелачивания огарка:  $1,0 \pm 0,1$  по меди,  $0,87 \pm 0,1$  по цинку,  $0,56 \pm 0,1$  по железу.

4. Результаты расчета кажущейся константы скорости реакции выщелачивания показали слабую зависимость ее от температуры, что хорошо коррелирует с данными термодинамического анализа.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-38-60095 мол\_а\_дк.*

## Литература

1. Чантурия В.А. Современные проблемы обогащения минерального сырья в России // Обогащение руд. 2000. No. 6. С. 3—8.
2. Бочаров В.А., Херсонская И.И., Агафонова Г.С., Лапина Г.А., Карбовская А.В., Морозов Б.А., Серебрянников Б.Л. Совершенствование технологии обогащения и повышение комплексности использования сульфидных медно-цинковых руд // Цвет. металлы. 1997. No. 2. С. 8—11.
3. Урвас О. Проблемы добычи и переработки медно-цинковых руд Уральского региона // Цвет. металлы. 1999. No. 12. С. 9—11.
4. Халемский А.М., Тарасов А.В., Казанцев А.Н. Плавка в печи Ванюкова медно-цинкового сульфидного сырья. Екатеринбург: Кедр, 1993.
5. Жумашев К.Ж., Каримова Л.М., Юн А.Б., Токбула-

тов Т.Е., Кайралапов Е.Т., Жиембаева Д.М. Исследование процесса сульфатизирующего обжига черново-го медного концентрата забалансовой руды Анненского месторождения // Вестн. ЮУрГУ. 2012. No. 15. С. 91—96.

6. Саргсян Л.Е., Оганесян А.М. Активированный сульфатизирующий обжиг халькопиритового концентрата для серно-кислотного выщелачивания // Изв. вузов. Цвет. металлургия. 2010. No. 5. С. 11—13.
7. Neon-Siougouna P., Scordilis D. Sulphation of a Greek complex sulphide concentrate // Hydrometallurgy. 1990. Vol. 25. No. 3. P. 367—374.
8. Мартиросян М.В., Григорян Г.С., Григорян С.К. Применение сульфатизирующего обжига в процессах комплексного извлечения ценных компонентов из полиметаллического концентрата // Уч. записки Ереванского гос. ун-та. 2010. No. 2. С. 19—23.
9. John Lusk, Brian O.E. Calder. The composition of sphalerite and associated sulfides in reactions of the Cu—Fe—Zn—S, Fe—Zn—S and Cu—Fe—S systems at 1 bar and temperatures between 250 and 535 °C // Chem. Geol. 2004. Vol. 203. P. 319—345.
10. Guler E., Seyrankaya A., Cocen I. Effect of sulfation roasting on metal extraction from Cinkur zinc leach residue // J. Ore Dress. 2008. Vol. 10. Iss. 19. P. 1—10.
11. Zhang Yali, Yu Xianjin, Li Xiaobin. Zinc recovery from franklinite by sulphation roasting // Hydrometallurgy. 2011. Vol. 109. P. 211—214.
12. Balarini J.C., Polli L.O., Miranda T.S. Importance of roasted sulphide concentrates characterization in the hydrometallurgical extraction of zinc // Miner. Eng. 2008. Vol. 21. P. 100—110.
13. Горбунов А.И., Гуров А.А., Филиппов Г.Г. Теоретические основы общей химии: Учеб. для техн. вузов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001.
14. Ахназарова С.Л., Кафаров В.В. Методы оптимизации эксперимента в химической технологии. М.: Высш. шк., 1985.
15. Ротинян А.Л., Дроздов В.В. Кинетика процесса обжига, выщелачивания и цементации // Журн. общ. химии. 1949. Вып. 10. С. 1843—1852.

## References

1. Chanturiya V.A. Sovremennye problemy obogashcheniya mineral'nogo syr'ya v Rossii [Mineral processing current issues in Russia]. *Obogashchenie rud*. 2000. No. 6. P. 3—8.
2. Bocharov V.A., Khersonskaya I.I., Agafonova G.S., Lapshina G.A., Karbovskaya A.V., Morozov B.A., Serebryannikov B.L. Sovershenstvovanie tekhnologii obogashcheniya

- i povыshenie kompleksnosti ispol'zovaniya sul'fidnykh medno-tsinkovykh rud [Improved processing technology and increasing complexity of the sulphide copper-zinc ores usage]. *Tsvetnye metally*. 1997. No. 2. P. 8—11.
3. *Urvas O.* Problemy dobychi i pererabotki medno-tsinkovykh rud Ural'skogo regiona [Mining and processing problems of copper-zinc ores in the Ural region]. *Tsvetnye metally*. 1999. No. 12. P. 9—11.
  4. *Khalemskii A.M., Tarasov A.V., Kazantsev A.N.* Plavka v pechi Vanyukova medno-tsinkovogo sul'fidnogo syr'ya [Melting of copper-zinc sulfide raw material in Vanyukov furnace]. Ekaterinburg: Kedr, 1993.
  5. *Zhumashev K.Zh., Karimova L.M., Yun A.B., Tokbulatov T.E., Kairalapov E.T., Zhiembaeva D.M.* Issledovaniya protsessa sul'fatiziruyushchego obzhiga chernovogo mednogo kontsentrata zabalansovoi rudy Annenskogo mestorozhdeniya [Research of sulphatization roasting process rough copper concentrate off-balance ore deposits Annensky]. *Vestnik YuUrGU*. 2012. No. 15. P. 91—96.
  6. *Sargsyan L.E., Oganesyanyan A.M.* Aktivirovannyi sul'fatiziruyushchii obzhig khal'kopiritovogo kontsentrata dlya serno-kislotnogo vyshchelachivaniya [Activated sulphatization roasting of chalcopyrite concentrate for sulfuric acid leaching]. *Izvestiya vuzov. Tsvetnaya metallurgiya*. 2010. No. 5. P. 11—13.
  7. *Neon-Siugouna P., Scordilis D.* Sulphation of a Greek complex sulphide concentrate. *Hydrometallurgy*. 1990. Vol. 25. No. 3. P. 367—374.
  8. *Martirosyan M.V., Grigoryan G.S., Grigoryan S.K.* Primenenie sul'fatiziruyushchego obzhiga v protsessakh kompleksnogo izvlecheniya tsennykh komponentov iz polimetallicheskogo kontsentrata [Sulphatization roasting processes application of valuable components complex extraction from polymetallic concentrate]. *Uchenye zapiski Erevanskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2010. No. 2. P. 19—23.
  9. *John Lusk, Brian O.E. Calder.* The composition of sphalerite and associated sulfides in reactions of the Cu—Fe—Zn—S, Fe—Zn—S and Cu—Fe—S systems at 1 bar and temperatures between 250 and 535 °C. *Chem. Geol.* 2004. Vol. 203. P. 319—345.
  10. *Guler E., Seyrankaya A., Cocen I.* Effect of sulfation roasting on metal extraction from Cinkur zinc leach residue. *J. Ore Dress*. 2008. Vol. 10. Iss. 19. P. 1—10.
  11. *Zhang Yali, Yu Xianjin, Li Xiaobin.* Zinc recovery from franklinite by sulphation roasting. *Hydrometallurgy*. 2011. Vol. 109. P. 211—214.
  12. *Balarini J.C., Polli L.O., Miranda T.S.* Importance of roasted sulphide concentrates characterization in the hydrometallurgical extraction of zinc. *Miner. Eng.* 2008. Vol. 21. P. 100—110.
  13. *Gorbunov A.I., Gurov A.A., Filippov G.G.* Teoreticheskie osnovy obshchei khimii [Theoretical foundations of general chemistry]. M.: Izd-vo MGTU im. N.E. Bauman, 2001.
  14. *Akhnazarova S.L., Kafarov V.V.* Metody optimizatsii eksperimenta v khimicheskoi tekhnologii [Optimization experiment methods in chemical technology]. M.: Vysshaya shkola, 1985.
  15. *Rotinyan A.L., Drozdov V.V.* Kinetika protsessa obzhiga, vyshchelachivaniya i tsementatsii [Roasting process, leaching and cementation kinetics]. *Zhurnal obshchei khimii*. 1949. Vol. 10. P. 1843—1852.