



О кинетике извлечения примесей из железного концентрата, полученного в ходе гидromеталлургической переработки чернового медного концентрата

© Л.М. Каримова, Т.А. Хажимухаметов, Е.Т. Кайралапов, А.Б. Юн

ТОО «КазГидроМедь», г. Караганда, Казахстан

Резюме: Цель – исследование физико-химических особенностей процесса осаждения высококачественного железного концентрата из растворов азотнокислотного выщелачивания бедного медно-сульфидного сырья и получение высококорентабельного, пригодного для непосредственной переработки на предприятиях черной металлургии продукта. Для проведения экспериментов по получению богатого и обедненного по содержанию примесей железного концентрата использован гидролитический осадок, содержащий 54,6% железа и многочисленные примеси, полученный при переработке растворов азотнокислотного выщелачивания чернового медного сульфидного концентрата Жезказганского месторождения. Для проведения аналитических исследований исходных материалов и получаемых продуктов изучаемых процессов применены современные аттестованные методы: рентгено-спектральный, рентгенофазовый, атомно-абсорбционный анализы, масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой. Получен высококачественный железный концентрат, содержащий минимальные количества кремния, алюминия, фосфора и серы. Получены частные и обобщенные уравнения, которые позволяют судить о влиянии исследуемых факторов на показатели процесса получения железного концентрата. Рассчитано значение кажущейся энергии активации процесса – 46,77 кДж/моль, что, вероятно, свидетельствует о наличии диффузионных затруднений, вызванных образованием твердых продуктов, пассивирующих поверхность растворяемого материала. Показана принципиальная возможность получения высококачественного железного концентрата из пром-продуктов переработки бедного медно-сульфидного концентрата Жезказганского месторождения. В ходе математической обработки экспериментальных данных определены уравнения, характеризующие степень влияния изучаемых факторов на показатели процесса. Установлено, что процесс получения кондиционного железного концентрата протекает в режиме диффузионных ограничений. Впервые получены многофакторные обобщенные зависимости для рассматриваемого процесса. Выполнены их аналитические преобразования. Эти методы могут быть использованы для изучения аналогичных процессов переработки подобного металлургического сырья.

Ключевые слова: выщелачивание, железный концентрат, раствор, примеси, частные зависимости, скорость процесса

Информация о статье: поступила в редакцию 07 июля 2020 г.; поступила после рецензирования и доработки 15 сентября 2020 г.; принята к публикации 30 октября 2020 г.

Для цитирования: Каримова Л.М., Хажимухаметов Т.А., Кайралапов Е.Т., Юн А.Б. О кинетике извлечения примесей из железного концентрата, полученного гидromеталлургической переработкой чернового медного концентрата. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2020. Т. 24. № 5. С. 1150–1158. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-5-1150-1158>

On kinetics of impurity extraction from iron concentrate obtained by rough copper concentrate hydrometallurgical processing

Lyutsiya M. Karimova, Tagir A. Khazhimukhametov, Yerlan T. Kairalapov, Alexander B. Yun

KazHydroMed LLP, Karaganda, Kazakhstan

Abstract: The purpose of the paper is to study the physical and chemical features of high-quality iron concentrate precipitation from nitric acid leaching solutions of low-grade copper-sulfide raw materials, and to obtain a highly profitable product which is suitable for direct processing at ferrous metallurgy enterprises. To conduct the experiments on obtaining impurity rich and depleted iron concentrate a hydrolytic precipitate containing 54.6% iron and numerous impurities obtained as a result of processing of nitric acid leaching solutions of rough copper sulfide concentrate from the Zhezkazgan deposit is used. Analytical studies of initial materials and resulting products of the processes under investigation are conducted using the modern certified methods including the x-ray spectral, x-ray phase, atomic absorption analysis, mass

spectrometry method with inductively coupled plasma. We have obtained a high-quality iron concentrate containing minimal amounts of silicon, aluminum, phosphorus and sulfur as well as partial and generalized equations that give an idea of the influence of the studied factors on the indicators of the iron concentrate production process. The apparent activation energy of the process has been calculated – 46.77 kJ/mol. It probably indicates the presence of diffusion complications caused by the formation of solid products passivating the surface of the material being dissolved. The principal possibility of obtaining high-quality iron concentrate from processing poor copper-sulfide concentrate middlings of the Zhezkazgan deposit is shown. The mathematical processing of experimental data has resulted in the determination of equations that characterize the degree of influence of the studied factors on the process indicators. It is found out that the production process of the saleable iron concentrate proceeds in the mode of diffusion restrictions. It is the first time, when multivariate generalized dependencies are obtained for the process under consideration and their analytical transformations are performed. These methods can be used to study the analogous processing of similar metallurgical raw materials.

Keywords: leaching, iron concentrate, solution, impurities, partial dependencies, process speed

Information about the article: Received July 07, 2020; revised September 15, 2020; accepted for publication on October 30, 2020

For citation: Karimova LM, Khazhimukhametov TA, Kairalapov ET, Yun AB. On kinetics of impurity extraction from iron concentrate obtained by rough copper concentrate hydrometallurgical processing. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2020;24(5):1150–1158. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-5-1150-1158>

ВВЕДЕНИЕ

В процессах гидрометаллургической переработки как природного, так и техногенного сырья образуются значительные объемы растворов, в которых концентрируется железо, а также щелочные и щелочноземельные металлы. Такие растворы требуют переработки с целью выделения ценных компонентов и повторного использования технической воды. Однако получаемые в настоящее время железосодержащие осадки обогащены примесями тяжелых цветных металлов, серы, кальция и фосфора. Такие осадки не имеют товарной ценности.

В ходе азотнокислотной переработки черновое медного сульфидного концентрата [1–7] в раствор переходят соединения кальция (сульфат, фосфат и пр.), которые при гидролизе соосаждаются совместно с железом. Выделение примесей из осадка позволит получать товарный железосодержащий концентрат. Использование традиционных способов (магнитная сепарация, магнетизирующий обжиг [8–11]) либо малоэффективно, либо экономически нецелесообразно.

Применение процессов химического обогащения является перспективным. Результаты пионерских исследований по щелочной обработке железных руд приведены в работе [12]. В ходе высокотемпературной обработки руды в раствор гидроксида натрия переходят

до 80% кремния и 90% алюминия в форме силикатов и алюминатов натрия соответственно. Извлечение в раствор серы и фосфора близко к 100%.

Авторы работы [13] сообщают о возможности получения концентрата, содержащего до 50% железа, путем обработки бедной железной руды растворами гидроксида натрия. При этом извлечение кремния и алюминия в раствор достигает 50%, а выход концентрата – 96%.

В работах [14, 15] показана возможность удаления примесей из руд, концентратов и пиритных огарков с помощью раствора гидроксида натрия. Извлечение примесных элементов в раствор зависит от морфологии обрабатываемого сырья. Так, содержание кремния в Керченской руде удалось снизить с 13,7 до 0,40%, в Криворожском концентрате – с 8,62 до 0,76%, в пиритном огарке – с 6,76 до 4,70%. В щелочной раствор, в отличие от кальция и магния, практически полностью переходят сера, фосфор и мышьяк.

Маркетинговые данные свидетельствуют о том, что рынок пересыщен различным вторичным железосодержащим сырьем низкого качества. Богатые железные концентраты, содержащие более 62% основного компонента и минимальные количества примесей, на рынке практически не представлены. Одной из причин этого является отсутствие ком-

плексных исследований, направленных на получение таких концентратов из промпродуктов гидрометаллургической переработки первичного и вторичного сырья цветных металлов, с последующей промышленной реализацией.

Целью данной работы является исследование процесса выделения высококачественного железного концентрата из растворов азотнокислотного выщелачивания бедного медно-сульфидного сырья, пригодного для непосредственной переработки на предприятиях черной металлургии.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве объекта исследований выбран черновой медный сульфидный концентрат Жезказганского месторождения (табл. 1)¹. Азотнокислотное вскрытие проводили при следующих параметрах: $C_{HNO_3} = 170$ г/дм³, $C_{Cl} = 30$ г/дм³; температура $t = 90^\circ\text{C}$, продолжительность $\tau = 60$ мин, Ж:Т = 4:1. Извлечение ценных компонентов в азотнокислотный раствор составило, %: Cu – 99, Fe – 89,0, Ag – 98, Re – 99.

Таблица 1. Химический состав чернового медного сульфидного концентрата

Table 1. Chemical composition of the rough copper sulfide concentrate

Компонент	Содержание, %	Компонент	Содержание, %
Cu	7,66	Zn	0,75
Fe	9,76	Al	4,57
Mg	1,16	Si	28,36
S	2,97	Ti	0,4
Ag, г/т	31,8	Pb	0,548
Re, г/т	0,57	CaO	3,48

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Гидролитическое осаждение железа из раствора проводили при pH 2,8–3. Химический состав полученного осадка, предварительно высушенного при температуре 250°C , приведен в табл. 2.

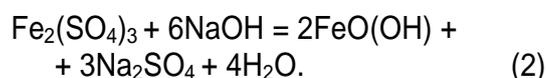
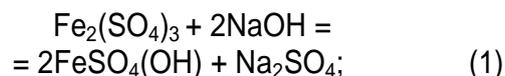
Переработка раствора азотнокислотной обработки чернового медного концентрата с получением железосодержащего осадка проведена впервые.

Таблица 2. Химический состав осадка
Table 2. Chemical composition of the sediment

Компоненты	Содержание, % масс.	Компоненты	Содержание, % масс.
Fe	54,6	Zn	0,07
Cu	0,06	Al	3,7
P	0,298	Pb	0,05
S	4,45	Ca	1,05

Для планирования экспериментов использовали метод, приведенный в работе [16]. В ходе экспериментов варьировали следующие параметры: концентрация гидроксида натрия (1–5%), продолжительность выщелачивания (30–240 мин), температура раствора (25 – 60°C). Содержание железа, фосфора и серы в получаемых продуктах определяли аналитическими методами. Центральные эксперименты проводили при следующих параметрах: масса осадка – 100 г (влажность – 80%), Ж:Т = 2:1, температура 25°C (термостатирующий реактор марки «Minni-100-1»), скорость перемешивания – 300 об/мин, концентрация NaOH – 5%. Полученные данные приведены в табл. 3. Зависимости, описывающие влияние различных факторов на содержание железа, фосфора и серы в концентрате, представлены на рис. 2.

Согласно данным, приведенным на рис. 1, полнота извлечения серы имеет определенный предел. Это обусловлено тем, что в растворах щелочей происходит гидролиз сульфата железа(III) с образованием, в зависимости от концентрации гидроксида натрия, соответствующих продуктов:



¹Каримова Л.М. Научные основы грануляции, обжига и выщелачивания в гидрометаллургической переработке забалансового медного и медно-молибденового сырья: дис. ... д-ра техн. наук: 05.16.02. Екатеринбург, Караганда, 2018. 334 с.

Таблица 3. Результаты экспериментов. Условия и результаты центрального опыта дополнительно выделены
 Table 3. Experiment results. Conditions and results of the central experiment are given in bold

Исследуемый фактор условия проведения эксперимента		β_{Fe} (%)	β_{Fe}	β_{Fe} по	β_S (%)	ϵ_s , %	ϵ_s , %	ϵ_s , %	β_P	β_P	β_P по	β_{Cu} (%)	β_{Al} (%)	β_{Si} (%)	β_{Zn} (%)
		эксп.	(%)	(3)	эксп.	эксп.	расч.	по (4)	эксп.	расч.	(5)				
C_{NaOH} , %	1	54,6	56,66	56,63	2,26	49,21	49,93	42,50	0,226	0,24	0,225	0,07	2,95	0,239	0,08
	2	59,0	57,98	57,96	1,34	69,89	69,713	70,38	0,241	0,2273	0,213	0,05	3,56	0,268	0,09
	3	59,8	59,31	59,287	0,78	82,47	81,285	88,01	0,173	0,2136	0,200	0,06	3,84	0,239	0,09
	4	60,5	60,64	60,615	0,39	91,24	89,496	95,36	0,180	0,1999	0,187	0,09	3,63	0,308	0,08
	5	61,4	61,97	61,943	0,29	93,48	95,865	92,45	0,183	0,1862	0,175	0,07	3,61	0,240	0,19
t , мин	0	54,6	54,60	54,60	4,45	0	0	0	0,14	0,14	0,14	0,06	1,34	0,30	0,07
	30	60,3	58,48	58,74	0,404	90,92	91,381	91,01	0,15	0,1562	0,148	0,08	3,49	0,33	0,09
	60	61,3	60,34	60,62	0,290	93,48	92,843	92,45	0,17	0,1694	0,161	0,07	3,61	0,240	0,19
	120	61,4	62,44	62,72	0,249	94,41	94,304	93,91	0,176	0,1742	0,166	0,05	3,82	0,318	0,08
	240	61,2	60,16	60,43	0,201	95,48	95,764	95,39	0,09	0,0974	0,093	0,04	3,80	0,343	0,09
t , °C	25	61,4	60,86	60,615	0,29	93,48	93,134	92,45	0,183	0,1755	0,161	0,07	3,61	0,240	0,19
	40	60,9	61,47	61,219	0,16	96,41	96,017	94,75	0,11	0,1455	0,134	0,055	2,82	0,217	0,096
	60	62,3	62,27	62,02	0,096	97,84	98,05	96,79	0,13	0,1055	0,097	0,046	2,19	0,248	0,089

Фосфор плохо поддается выщелачиванию в течение первых 2-х ч, после чего его содержание в кеке начинает снижаться.

В течение первого часа выщелачивания происходит некоторое замедление процесса, что не может быть объяснено повышенным расходом гидроксида натрия на образование соответствующего силиката, поскольку в данном процессе обеспечивается практически десятикратный избыток щелочи в растворе (начальная концентрация NaOH – 1%). Причина данного явления, вероятно, связана с диффузионными затруднениями, вызванными формирующимся слоем выщелоченного материала (кека), что также характерно для экспериментов с концентрированными растворами NaOH [15].

Частные уравнения, приведенные в табл. 4, адекватны, учитывая значения коэффициентов нелинейной множественной корреляции R и их значимости t_R [16], и пригодны для получения математической модели процесса¹.

Приведенные уравнения поддаются обобщению по методу, предложенному в работе [16], в виде их произведения с нормировкой по центральному экспериментальному значению (в данном случае в %: для (Fe) = 60,615; (S) = 92,449; (P) = 0,179). Тогда обобщенные уравнения будут иметь вид:

$$\beta_{Fe} = 2,72 \cdot 10^{-4} (1,3286 C_{NaOH} + 55,329) (-3 \cdot 10^{-4} \tau^2 + 0,089 \tau + 56,082) (0,0403 t + 59,855),$$

$$R = 0,9097, t_R = 17,50 > 2; \quad (3)$$

$$\epsilon_s = 1,17 \cdot 10^{-4} \cdot (-5,04 \cdot C_{NaOH}^2 + 42,54 \cdot C_{NaOH} + 4,28) \cdot 84,623 \times \tau^{0,0226} \cdot 79,123 \cdot t^{0,0524},$$

$$R = 0,9097, t_R = 17,50 > 2; \quad (4)$$

$$\beta_P = 31,403 (0,241 - 0,0137 C_{NaOH}) \times (-4 \cdot 10^{-6} \tau^2 + 0,0008 \tau + 0,136) \times (0,225 - 0,002 t),$$

$$R = 0,8925, t_R = 14,56 > 2. \quad (5)$$

Составляющие члены обобщенных уравнений позволяют судить о влиянии исследуемых факторов на показатели извлечения примесей из железного концентрата (табл. 5).

Для кинетического анализа¹ выщелачивания серы из железного концентрата применяли обобщенное уравнение (4).

С целью определения скорости процесса¹ проведены преобразования уравнения (4):

$$0,7834 \cdot (-5,04 C_{NaOH}^2 + 42,537 \times \times C_{NaOH} + 4,278) \cdot t^{0,0524} = A; \quad \epsilon_s = A \cdot \tau^{0,0226}; \quad (6)$$

$$\tau = \left(\frac{\varepsilon_s}{A} \right)^{\frac{1}{0.0226}}; \quad (7)$$

$$\frac{d\varepsilon_s}{d\tau} = 0,0226 \cdot A \cdot \tau^{-0.9774}; \quad (8)$$

$$\frac{d\varepsilon_s}{d\tau} = 0,0226 \cdot A \cdot \left(\frac{\varepsilon_s}{A} \right)^{-\frac{0.9774}{0.0226}} = \quad (9)$$

$$= 0,0226 \cdot A^{1+\frac{0.9774}{0.0226}} \cdot \varepsilon_s^{-\frac{0.9774}{0.0226}}.$$

$$\frac{d\varepsilon_s}{d\tau} = 0,0226 \cdot A^{44.25} \cdot \varepsilon_s^{-43.25}.$$

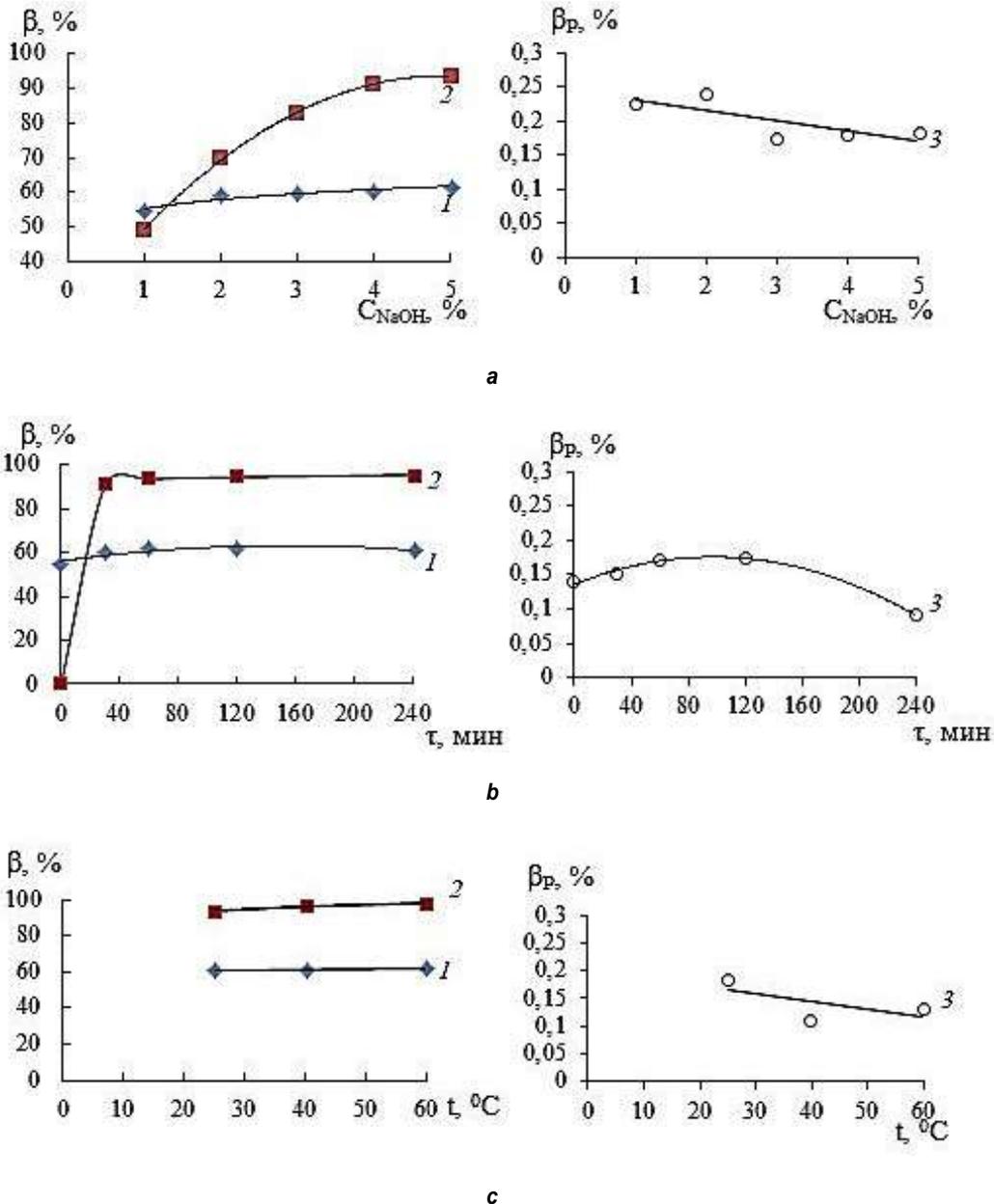


Рис. 1. Зависимости влияния различных факторов на содержание железа, фосфора и серы в железном концентрате: а – концентрация NaOH, б – продолжительность выщелачивания, с – температура раствора; 1 – содержание железа, 2 – извлечение серы, 3 – содержание фосфора

Fig. 1. Dependences of various factor effects on the content of iron, phosphorus and sulfur in the iron concentrate: a – NaOH concentration, b – leaching duration, c – solution temperature; 1 – iron content, 2 – sulfur extraction, 3 – phosphorus content

Таблица 4. Частные уравнения содержания железа, фосфора и извлечения серы в раствор из железного концентрата с определением коэффициента нелинейной множественной корреляции R и его значимости t_R
Table 4. Partial equations of iron and phosphorus content and sulfur extraction from the iron concentrate into solution with the determination of the coefficient of nonlinear multiple correlation R and its value t_R

Функции	R	Условие $t_R > 2$
$\beta_{Fe} = 1,3286 C_{NaOH} + 55,329$	0,680	2,19 > 2
$\beta_{Fe} = -0,0003 \tau^2 + 0,089 \tau + 56,082$	0,866	5,99 > 2
$\beta_{Fe} = 0,0403 t + 59,855$	0,910	17,50 > 2
$\varepsilon_S = -5,0441 \cdot C_{NaOH}^2 + 42,537 \cdot C_{NaOH} + 4,2777$	0,990	104,20 > 2
$\varepsilon_S = 84,623 \cdot \tau^{0,0226}$	0,999	12,21 > 2
$\varepsilon_S = 79,123 \cdot t^{0,0524}$	0,975	19,72 > 2
$\beta_P = -0,0137 C_{NaOH} + 0,241$	0,652	1,964 < 2
$\beta_P = -4 \cdot 10^{-6} \tau^2 + 8 \cdot 10^{-4} \tau + 0,136$	0,9860	61,67 > 2
$\beta_P = -0,002t + 0,225$	0,9219	20,36 > 2

Таблица 5. Результаты расчета скорости процесса выщелачивания серы и кажущейся энергии активации по модели (9)
Table 5. Calculation results of the sulfur leaching rate and the apparent activation energy according to the model (9)

№	C_{NaOH} , %	t, °C	ε/τ , %/мин	$\ln(\frac{\partial \varepsilon}{\partial \tau})$	1/T, К	E, кДж/моль·К
1	1	25	$1,285 \cdot 10^{-16}$	-36,59	0,0034	46,769
2	1	40	$3,821 \cdot 10^{-16}$	-35,5	0,0032	
3	1	60	$9,782 \cdot 10^{-16}$	-34,56	0,003	
4	3	25	0,013	-4,369	0,0034	46,769
5	3	40	0,038	-3,279	0,0032	
6	3	60	0,096	-2,339	0,003	
7	5	25	0,116	-2,157	0,0034	46,769
8	5	40	0,344	-1,068	0,0032	
9	5	60	0,88	-0,127	0,003	

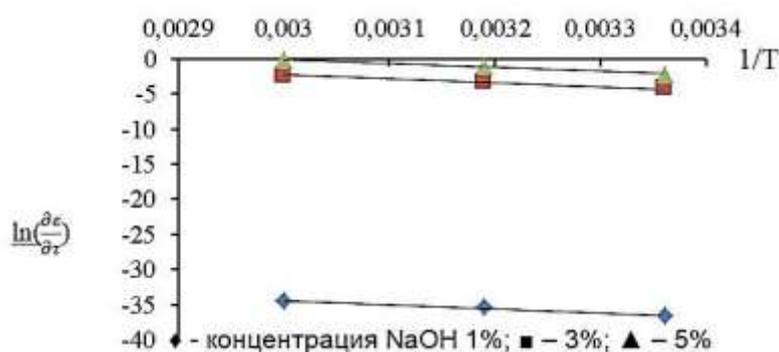


Рис. 2. Зависимость скорости от температуры
Fig. 2. Rate vs temperature

Обобщенное уравнение в дифференциальной форме имеет вид:

$$\frac{\partial \varepsilon_s}{\partial \tau} = 0,0226 \cdot \varepsilon_s^{-43,25} \times$$

$$\times \left[0,7834 \cdot (-5,04 \cdot C_{NaOH}^2 + 42,537 \cdot C_{NaOH} + 4,278) \cdot t^{0,0524} \right]^{44,25} \quad (9)$$

В табл. 5 приведены рассчитанные значения скорости для температур 25, 40 и 60°C.

Определена величина кажущейся энергии активации процесса извлечения серы в раствор (извлечение серы – 90%, концентрация NaOH – 1%) – 46,77 кДж/моль. Для указанного процесса характерно наличие диффузионных затруднений, вызванных образованием твердых пассивирующих продуктов.

Для других концентраций гидроксида натрия характерны аналогичные значения кажущейся энергии активации, что говорит о наличии

диффузионных затруднений в широком диапазоне влияющих факторов и согласуется с данными, приведенными в работе [17].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые получены многофакторные обобщенные зависимости для рассматриваемого процесса. Выполнены аналитические преобразования полученных зависимостей. Эти методы [18–20] были использованы для изучения аналогичных процессов переработки металлургического сырья.

Библиографический список

1. Юн А.Б., Захарьян С.В., Каримова Л.М., Терентьева И.В., Серикбай А.У. Исследования по азотнокислому выщелачиванию чернового медного концентрата ЖОФ из руд текущей добычи ТОО «Корпорация Казахмыс» // Абишевские чтения–2016; Инновации в комплексной переработке минерального сырья: материалы науч.-практ. конф. (г. Алматы, 21–22 января, 2016 г.). Алматы: Национальный центр по комплексной переработке минерального сырья Республики Казахстан, 2016. С. 581–583.
2. Рогожников Д.А., Русалев Р.Э., Дизер О.А., Набойченко С.С. Азотнокислотное вскрытие упорных сульфидных концентратов, содержащих благородные металлы // Цветные металлы. 2018. № 12. С. 38–44. <https://doi.org/10.17580/tsm.2018.12.05>
3. Rogozhnikov D.A., Shoppert A.A., Dizer O.A., Karimov K.A., Rusalev R.E. Leaching kinetics of sulfides from refractory gold concentrates by nitric acid // Metals. 2019. Vol. 9. No. 4. P. 465. <https://doi.org/10.3390/met9040465>
4. Рогожников Д.А., Захарьян С.В., Дизер О.А., Каримов К.А. Азотнокислотное выщелачивание ажалыско-го сульфидного мышьяковистого медьсодержащего концентрата // Цветные металлы. 2020. № 8. С. 8–11. <https://doi.org/10.17580/tsm.2020.08.02>
5. Rusalev R.E., Rogozhnikov D.A., Naboichenko S.S. Nitric acid treatment of olympiada deposit refractory gold-bearing concentrate // Materials Science Forum. 2019. Vol. 946. P. 541–546. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.946.541>
6. Liu Jian, Wen Shuming, Liu Dan, Lv Mengyang, Liu Lijun. Response surface methodology for optimization of copper leaching from a low-grade flotation middling // Mining, Metallurgy & Exploration. 2011. Vol. 28. P. 139–145. <https://doi.org/10.1007/bf03402246>
7. Агапитов Я.Е., Захарьян С.В., Каримова Л.М., Хажимухаметов Т.А. Выбор оптимального способа гидророметаллургической переработки высокосернистых медных сульфидных концентратов // Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья: матер. XXIV Междунар. науч.-техн. конф., проводимой в рамках XVII Уральской горнопромышленной декады (г. Екатеринбург, 9–12 апреля). Екатеринбург: Изд-во «Форт Диалог-Исеть», 2019. С. 300–304.
8. Мухтар А.А., Мухымбекова М.К., Макашев А.С., Савин В.Н. Термомагнитное обогащение и дефосфорация бурожелезняковых руд и концентратов // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2018. Т. 61. № 9. С. 708–713. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-9-708-713>
9. Мухтар А.А., Мухымбекова М.К., Макашев А.С., Момынбеков А.Д., Нускабеков Ж.С., Касымова Б.К. Обжигмагнитное обогащение лимонитизированной руды месторождения Кок-Булак // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. № 9. С. 88–94.
10. Мухтар А.А., Рау А.П., Макашев А.С., Момынбеков А.Д. Исследование процесса термомагнитного обогащения бурожелезняковых руд Лисаковского месторождения // Промышленность Казахстана. 2016. № 4. С. 58–61.
11. Mukhtar A.A., Muehymbekova M.K., Nurumgaliev A.H., Momyzbekov A.D., Nuskabekov J.S. Investigation of magnetic roasting process of ayatsk limonite ore with water-oil emulsion // XVI Balkan Mineral Processing Congress: Book of Proceedings (Belgrade, 17–19 June 2015). Belgrade: Mining Institute Belgrade, 2015. P. 269–271.
12. Стась Н.Ф. Очистка железных руд от кремния растворами щелочи при атмосферном давлении // Фундаментальные исследования. 2013. № 6. С. 300–305. [Электронный ресурс]. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_18993056_10075204.pdf (23.06.2020).
13. Стась Н.Ф. Технологические условия обработки железных руд в автоклаве // Фундаментальные исследования. 2013. № 8. Ч. 1. С. 64–68. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.fundamental-research.ru/ru/article/view?id=31871> (23.06.2020).
14. Стась Н.Ф. Химическое обогащение железных руд: монография. Томск: Изд-во ТПУ, 2013. 170 с.
15. Стась Н.Ф. Химическая очистка железных руд от примесей // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 1. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=7877> (23.06.2020).
16. Малышев В.П. Кинетический и технологический анализ обобщающих математических моделей хими-

ко-металлургических процессов // Доклады Национальной академии наук Республики Казахстан. 2008. № 2. С. 13–18. [Электронный ресурс]. URL: http://nblib.library.kz/elib/library.kz/jurnal/d_2008_2/Malish ev0802.pdf (25.06.2020).

19. Стась Н.Ф. Очистка железной руды от примесей разбавленными растворами кислот и щелочей // Фундаментальные исследования. 2014. № 6. С. 41–44. [Электронный ресурс]. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_21567595_72936227.pdf (25.06.2020).

20. Нагуман П.Н., Каримова Л.М., Токаева З.М., Шин-

баева У.Б. Многофакторное моделирование процесса выщелачивания окисленных молибденовых продуктов в сернокислых растворах // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. 2009. № 4. С. 17–21.

21. Каримова Л.М. Кинетическое обоснование процесса растворения окисленных молибденовых продуктов в сернокислых растворах // Вестник Карагандинский государственный университет им. Е.А. Букетова. Серия: Химия. 2009. № 3. С. 19–27.

22. Каримова Л.М., Кайралапов Е.Т., Жумашев К.Ж. Лабораторная проверка новой кинетической модели измельчения // Обогащение руд. 2013. № 3. С. 27–29.

References

1. Yun AB, Zahar'yan SV, Karimova LM, Terent'eva IV, Serikbaj AU. Studies of nitric acid leaching of rough copper concentrate from Zhezkazgan deposit from the ores of current production of Kazakhmys Corporation LLP. In: *Abishevskie chteniya–2016; Innovacii v kompleksnoj pererabotke mineral'nogo syr'ya: materialy nauchno-prakticheskoy konferencii* = Abishevskie Readings – 2016; Innovations in complex processing of mineral raw materials: Proceedings of the scientific and practical conference. 21–22 January 2016, Almaty. Almaty: *Nacional'nyj centr po kompleksnoj pererabotke mineral'nogo syr'ya Respubliki Kazahstan*; 2016, p. 581–583.

2. Rogozhnikov DA, Rusalev RE, Dizer OA, Naboychenko SS. Nitric acid loosening of rebellious sulphide concentrates containing precious metals. *Tsvetnye Metally*. 2018;12:38–44. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/tsm.2018.12.05>

3. Rogozhnikov DA, Shoppert AA, Dizer OA, Karimov KA, Rusalev RE. Leaching kinetics of sulfides from refractory gold concentrates by nitric acid. *Metals*. 2019;9(4):465. <https://doi.org/10.3390/met9040465>

4. Rogozhnikov DA, Zakharian SV, Dizer OA, Karimov KA. Nitric acid leaching of the copper-bearing arsenic sulphide concentrate of Akzhal. *Tsvetnye Metally*. 2020;8:8–11. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/tsm.2020.08.02>

5. Rusalev RE, Rogozhnikov DA, Naboichenko SS. Nitric acid treatment of olympiada deposit refractory gold-bearing concentrate. *Materials Science Forum*. 2019;946:541–546. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.946.541>

6. Liu Jian, Wen Shuming, Liu Dan, Lv Mengyang, Liu Lijun. Response surface methodology for optimization of copper leaching from a low-grade flotation middling. *Mining, Metallurgy & Exploration*. 2011;28:139–145. <https://doi.org/10.1007/bf03402246>

7. Agapitov YaE, Zahar'yan SV, Karimova LM, Hazhimukhametov TA. Selection of the optimal method for hydrometallurgical processing of high-sulfur copper sulfide concentrates. In: *Nauchnye osnovy i praktika pererabotki rud i tekhnogenogo syr'ya: materialy XXIV Mezhdunar. nauchno-tekhnicheskoy konferencii, provodimoy v ramkah XVII Ural'skoj gornopromyshlennoj dekady = Scientific foundations and processing practice of ores and technogenic raw materials: Proceedings of XXIV International scientific and technical conference held within the frame-*

work of XVII Ural Mining Decade. 9–12 April 2019, Ekaterinburg. Ekaterinburg: Fort Dialog-Iset'; 2019, p. 300–304. (In Russ.)

8. Mukhtar AA, Mukhymbekova MK, Makashev AS, Savin VN. Thermomagnetic concentration and dephosphorizing of brown clay iron ore and concentrates. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2018;61(9):708–713. (In Russ.) <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-9-708-713>

9. Mukhtar AA, Mukhymbekova MK, Makashev AS, Momynbekov AD, Nuskabekov ZHS, Kasymova BK. Magnetic roasting enrichment of Coc-Bulak deposit limonite ore. *Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten' = Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2015;9:88–94. (In Russ.)

10. Muhtar AA, Rau AP, Makashev AS, Momynbekov AD. Studying thermomagnetic enrichment of Lisakovskoe deposit brown iron ores. *Promyshlennost' Kazakhstana = Industry of Kazakhstan*. 2016;4:58–61.

11. Mukhtar AA, Muhymbekova MK, Nurumgaliev AH, Momynbekov AD, Nuskabekov JS. Investigation of magnetic roasting process of Ayatsk limonite ore with water-oli emulsion. In: *XVI Balkan Mineral Processing Congress: Book of Proceedings*. 17–19 June 2015, Belgrade. Belgrade: Mining Institute Belgrade; 2015, p. 269–271.

12. Stas NF. The cleaning of iron ore from silicium by alkali solutions at atmospheric pressure. *Fundamental'nye issledovaniya = Fundamental research*. 2013;6:300–305. Available from: https://elibrary.ru/download/elibrary_18993056_10075204.pdf [Accessed 23rd June 2020]. (In Russ.)

13. Stas NF. Technological conditions of iron ore pressure treatment. *Fundamental'nye issledovaniya = Fundamental research*. 2013;8-1;64–68. Available from: <https://www.fundamental-research.ru/ru/article/view?id=31871> [Accessed 23rd June 2020]. (In Russ.)

14. Stas NF. Chemical beneficiation of iron ores: monograph. Tomsk: Tomsk Polytechnic University; 2013, 170 p. (In Russ.)

15. Stas NF. A chemical cleaning of iron ores from impurities. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*. 2013;1. Available from: <https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=7877> [Accessed 23rd June 2020]. (In Russ.)



16. Malyshev VP. Kinetic and technological analysis of generalizing mathematical models of chemical and metallurgical processes. *Doklady Nacional'noj akademii nauk Respubliki Kazahstan*. 2008;2:13–18. Available from: http://nblib.library.kz/elib/library.kz/jurnal/d_2008_2/Malish ev0802.pdf [Accessed 25th June 2020].
17. Stas NF. Clarification of iron ore with dilute solutions of acids and alkalies. *Fundamental'nye issledovaniya = Fundamental research*. 2014;6:41–44. Available from: https://elibrary.ru/download/elibrary_21567595_72936227.pdf [Accessed 25th June 2020].
18. Naguman PN, Karimova LM, Tokaeva ZM, Shinbaev

- UB. A multifactor simulation of the process of leaching oxidized molybdenum products in sulfuric acid solutions. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya = Universities' Proceedings Non-Ferrous*. 2009;4:17–21. (In Russ.)
19. Karimova LM. Kinetic substantiation of oxidized molybdenum products dissolution in sulfuric acid solutions. *Vestnik Karagandinskij gosudarstvennyj universitet. Seriya: Himiya = Bulletin of the Karaganda university. Chemistry series*. 2009;3:19–27.
20. Karimova LM, Zhumashev KZ, Kayralapov YT. Laboratory check of a new kinetic model of grinding. *Obogashchenie rud*. 2013;3:27–29. (In Russ.)

Критерии авторства

Каримова Л.М., Хажимухаметов Т.А., Кайралапов Е.Т., Юн А.Б. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Каримова Люция Монировна,
доктор технических наук, доцент,
ведущий научный сотрудник
Научно-исследовательской лаборатории,
ТОО «КазГидроМедь»,
100000, г. Караганда, ул. Бухар-Жырау, 48, Казахстан;
✉ e-mail: lutsia.08@mail.ru

Хажимухаметов Тагир Айдарович,
инженер,
ТОО «КазГидроМедь»,
100000, г. Караганда, ул. Бухар-Жырау, 48, Казахстан;
e-mail: tahir.aydarovich@gmail.com

Кайралапов Ерлан Токпаевич,
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник
Научно-исследовательской лаборатории,
ТОО «КазГидроМедь»,
100000, г. Караганда, ул. Бухар-Жырау, 48, Казахстан;
e-mail: kairalapov.e@mail.ru

Юн Александр Борисович,
доктор технических наук,
директор,
ТОО «КазГидроМедь»,
100000, г. Караганда, ул. Бухар-Жырау, 48, Казахстан;
e-mail: leila_tlep@mail.ru

Authorship criteria

Karimova L.M., Khazhimukhametov T.A., Kairalapov Y.T., Yun A.B. declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Lyutsiya M. Karimova,
Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Leading Researcher of the Research Laboratory,
KazHydroMed LLP,
48, Bukhar-Zhyrau St., Karaganda 100000, Kazakhstan;
✉ e-mail: lutsia.08@mail.ru

Tagir A. Khazhimukhametov,
Engineer,
KazHydroMed LLP,
48, Bukhar-Zhyrau St., Karaganda 100000, Kazakhstan;
e-mail: tahir.aydarovich@gmail.com

Yerlan T. Kairalapov,
Cand. Sci. (Eng.),
Senior Researcher of the Research Laboratory,
KazHydroMed LLP,
48, Bukhar-Zhyrau St., Karaganda 100000, Kazakhstan;
e-mail: kairalapov.e@mail.ru

Alexander B. Yun,
Dr. Sci. (Eng.),
Director,
KazHydroMed LLP,
48, Bukhar-Zhyrau St., Karaganda 100000, Kazakhstan;
e-mail: leila_tlep@mail.ru