

К ВОПРОСУ ИЗУЧЕНИЯ СКОРОСТИ РАСТВОРЕНИЯ ФЕРРИТА ЦИНКА МЕТОДОМ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ ДИСКА

Д.С. Реутов, reutov-ds@mail.ru
А.Г. Крашенинин, agkrash@mail.ru
А.С. Гаврилов, gavrilov_208.90@mail.ru
Д.С. Алешин, dmitriy.aleshin1@yandex.ru

*Институт металлургии Уральского отделения Российской академии наук,
Екатеринбург, Россия*

Аннотация. Флотационная переработка отвальных медеплавильных шлаков приводит к образованию хвостов флотации, содержащих около 0,5 % меди и 4 % цинка, которые присутствуют в основных и второстепенных минеральных соединениях. Объемы накоплений в России данных отходов составляют от 120 до 140 млн т. В хвостах медь и цинк находятся в ферритах в виде отдельных минеральных фаз. Этот материал может являться сырьем для извлечения из него меди и цинка.

Исследована одна из составляющих данного сырья – феррит цинка – на предмет его скорости растворения методом вращающегося диска. Для этого был синтезирован феррит цинка ($ZnFe_2O_4$) по керамической технологии. Образец был аттестован методом РФА. Полученные ферриты были спрессованы в таблетки и закреплены в обойме из фторопласта для проведения экспериментов.

Изучена кинетика растворения феррита цинка в водном растворе серной кислоты в диапазоне концентрации от 7 до 300 г/дм³, при температуре 25, 45, 65 °С (298, 318, 338 К) и гидродинамическом режиме. С использованием уравнения Аррениуса была рассчитана энергии активации, а также были определены экспериментальные константы скорости. Получен вывод о кинетическом режиме растворения феррита цинка.

Ключевые слова: феррит цинка, синтез, скорость растворения, метод вращающегося диска, водный раствор серной кислоты

Благодарности. Работа выполнена в рамках программы, финансируемой из государственного бюджета № 122013100200-2 (FUMR-2022-0001).

Для цитирования: К вопросу изучения скорости растворения феррита цинка методом вращающегося диска / Д.С. Реутов, А.Г. Крашенинин, А.С. Гаврилов, Д.С. Алешин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2023. Т. 23, № 4. С. 36–45. DOI: 10.14529/met230403

Original article
DOI: 10.14529/met230403

TO THE QUESTION OF STUDYING THE DISSOLUTION RATE OF ZINC FERRITE USING THE ROTATING DISK METHOD

D.S. Reutov, reutov-ds@mail.ru
A.G. Krashenin, agkrash@mail.ru
A.S. Gavrilov, gavrilov_208.90@mail.ru
D.S. Aleshin, dmitriy.aleshin1@yandex.ru

*Institute of Metallurgy of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
Ekaterinburg, Russia*

Abstract. Flotation processing of copper smelting slag results in the formation of flotation tailings containing approximately 0.5% copper and 4% zinc, which are present in primary and secondary mineral compounds. Accumulated volumes of these wastes in Russia range from 120 to 140 million tons. Copper and zinc in the tailings are found in ferrites as separate mineral phases. This material can serve as a raw material for the extraction of copper and zinc.

One of the components of this raw material, zinc ferrite, was investigated for its dissolution rate using the rotating disk method. To do this, zinc ferrite ($ZnFe_2O_4$) was synthesized using ceramic technology. The sample was characterized using X-ray diffraction analysis (XRD). The obtained ferrites were compressed into tablets and fixed in a Teflon holder for experiments.

The kinetics of zinc ferrite dissolution in an aqueous solution of sulfuric acid were studied in the concentration range of 7 to 300 g/dm^3 , at temperatures of 25, 45, and 65 °C (298, 318, and 338 K), and under hydrodynamic conditions. Activation energies were calculated using the Arrhenius equation, and experimental rate constants were determined. A conclusion was drawn regarding the kinetic regime of zinc ferrite dissolution.

Keywords: zinc ferrite, synthesis, dissolution rate, rotating disk method, aqueous sulfuric acid solution

Acknowledgments. The study was carried out within the framework of a program financed from the state budget No. 122013100200-2 (FUMR-2022-0001).

For citation: Reutov D.S., Krashenin A.G., Gavrilov A.S., Aleshin D.S. To the question of studying the dissolution rate of zinc ferrite using the rotating disk method. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*. 2023;23(4):36–45. (In Russ.) DOI: 10.14529/met230403

Вводная часть

Флотационная переработка отвальных медеплавильных шлаков способствует накоплению тонкодисперсных материалов – хвостов флотации. В хвостах содержится около 0,5 % меди и 4 % цинка, которые входят в виде изоморфной примеси в основные и второстепенные минеральные соединения, а также образуют собственные минеральные фазы, в том числе ферриты.

В последние десятилетия активно ведутся исследования по переработке шлаков, содержащих медь и цинк, с использованием гидрометаллургических методов. Данные хвосты могут являться сырьем для получения концентратов меди и цинка.

Ранее методом вращающегося диска была изучена кинетика растворения минералов меди и цинка в растворах серной кислоты [1–3], в том числе в присутствии ионов Fe (III) и The Ferrooxidans методом вращающегося диска [4].

При разработке схемы гидрометаллургической переработки хвостов флотации [5] для исследования процесса выщелачивания минеральных медь- и цинксодержащих фаз проведено экспериментальное исследование скорости растворения ферритов меди и цинка методом вращающегося диска при низких концентрациях серной кислоты (7, 15, 40 g/dm^3), однако при применении этих данных для выщелачивания реального сырья не были достигнуты высокие показатели извлечения полезных металлов, но вектор извлечения показывал на необходимость повышения концентрации серной кислоты в растворителе. Для этого первоначально потребовалось уточнение кинетики при более высоких концентрациях серной кислоты до 300 g/dm^3 .

Для полноты картины кинетики растворения феррита цинка в водных растворах серной кислоты в данной публикации в графиках приведены ранее полученные результаты кинетических исследований при более низких концентрациях растворителя.

Методика эксперимента

Феррит цинка синтезировали по керамической технологии, которая состоит в совместном тщательном измельчении стехиометрического количества оксидов цинка и железа с последующим спеканием в муфельной печи при $T = 1100$ °C и выдержкой не менее 12 ч. Монофазность полученного $ZnFe_2O_4$ подтверждена рентгенофазовыми исследованиями. Изучена кинетика растворения ферритов меди и цинка в водном растворе серной кислоты при различной концентрации (7, 15, 40 g/dm^3), температуре (298, 318, 338 K) и скорости перемешивания (5, 10, 15 s^{-1}). Некоторые особенности методики описаны в [6, 7]. Опыты проводились в течение 5 ч с отбором проб через каждые 60 мин.

Использовали лабораторную установку, которая состоит из водяной бани, перемешивающего устройства с контролем скорости вращения вала с диском, термометра и pH-метра (рис. 1). Реакционный сосуд с водным раствором серной кислоты помещали в водяную баню, температуру в которой автоматически поддерживали с точностью $\pm 0,2$ °C. По достижении заданной температуры исследуемый образец феррита помещали в реакционный сосуд, из которого по ходу процесса растворения отбирали пробы и анализировали в них содержание элементов атомно-эмиссионным методом с индукционной плазмой

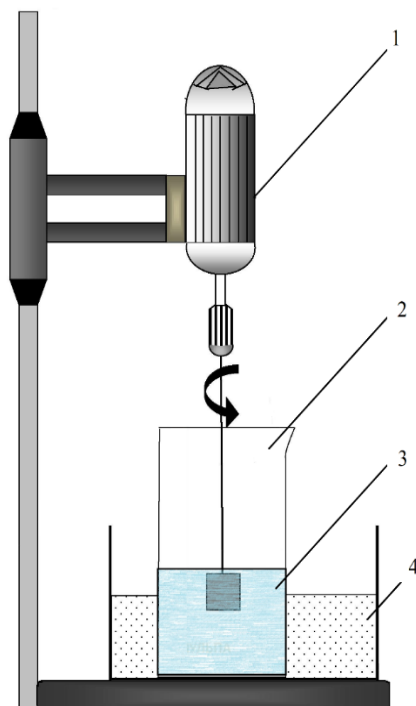
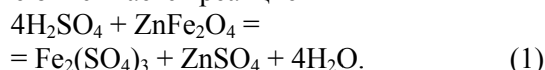


Рис. 1. Лабораторная установка: 1 – перемешивающее устройство ПЭ-8100 с блоком управления; 2 – стакан; 3 – водный раствор серной кислоты; 4 – водяная баня с терморегулятором
Fig. 1. Laboratory setup: 1 – PE-8100 mixing device with control unit; 2 – glass; 3 – aqueous solution of sulfuric acid; 4 – water bath with thermostat

(ELAN 9000, PerkinElmer, Канада). По результатам анализа рассчитывали скорость растворения меди и цинка.

Обработку экспериментальных данных проводили согласно методике обработки результатов кинетических опытов [8].

Растворение феррита цинка в серной кислоте описывается реакцией



Экспериментальные скорости растворения рассчитывали по кинетическим кривым, выражающим зависимость количества перешедшего в раствор цинка от продолжительности растворения ($\text{г} \cdot \text{мин}^{-1}$) (например, рис. 2). Установлено, что концентрация цинка в растворе со временем увеличивается линейно.

Построены зависимости скорости растворения феррита цинка от скорости вращения диска (рис. 3) и различной концентрации серной кислоты (рис. 4).

Скорость вращения диска изменяли от 5 до 15 с^{-1} . Найденная зависимость скорости растворения феррита цинка (v_3) от оборотов диска (\sqrt{n}) выражается во всех случаях прямой линией, проходящей через начало коор-

динат (см. рис. 3), что характерно для диффузионного режима процесса растворения. Интересно, что даже при 15 оборотах диска в секунду и высокой концентрации серной кислоты не наблюдается искривления прямой, т. е. диффузионный режим, по-видимому, устойчив во всем диапазоне оборотов диска.

При изучении скорости растворения феррита цинка в концентрациях серной кислоты ($7\text{--}300 \text{ г/дм}^3$) найдено, что скорость растворения увеличивается с ростом концентрации растворителя (см. рис. 4).

При расчете экспериментальной скорости растворения феррита цинка (формула (2), табл. 1) использовали зависимости изменения концентрации цинка в растворе от времени процесса. Скорость растворения (v , $\text{г} \cdot \text{мин}^{-1}$) численно равна тангенсу угла наклона прямой в координатах $Q\text{--}\tau$ (см. рис. 2).

$$v_3 = v / (60 \cdot A \cdot S), \quad (2)$$

где v_3 – удельная скорость растворения, $\text{моль} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$; v – скорость, $\text{г} \cdot \text{мин}^{-1}$; A – атомная масса элемента, $\text{г} \cdot \text{моль}^{-1}$; S – площадь поверхности образца, см^2 .

В связи с разрушением исследуемых образцов при высокой температуре ($> 333 \text{ К}$) и

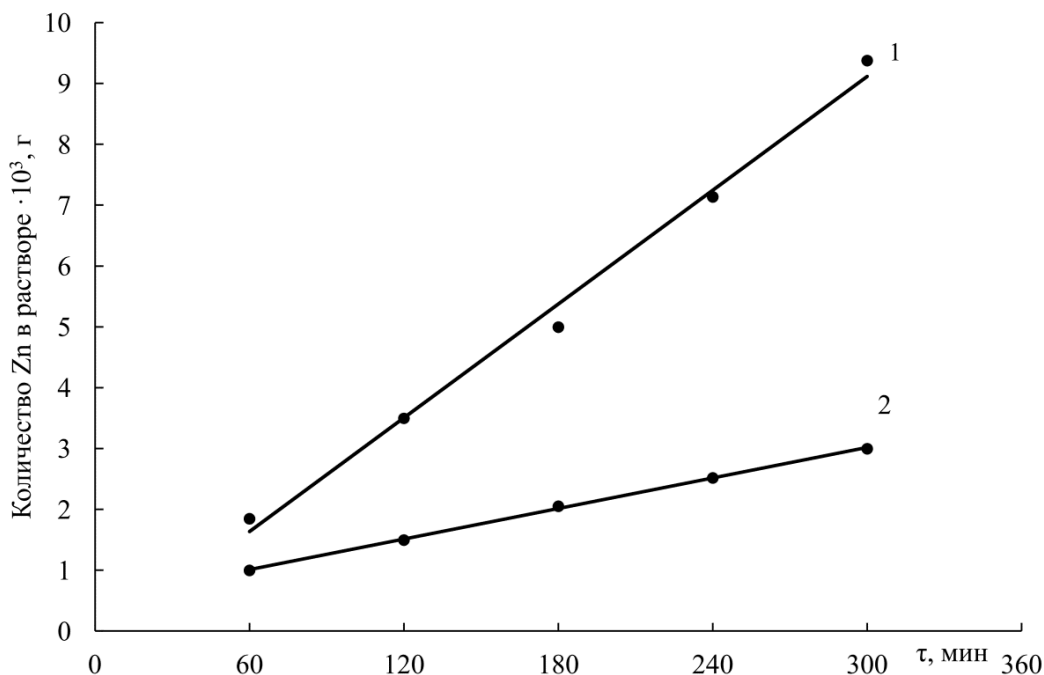


Рис. 2. Кинетические кривые растворения феррита цинка при температуре 298 К и концентрации H_2SO_4 40 г/дм³; частота вращения диска, с⁻¹: 1 – 5; 2 – 10
Fig. 2. Kinetic curves of zinc ferrite dissolution at a temperature of 298 K and a H_2SO_4 concentration of 40 g/dm³; disk rotation speed, s⁻¹: 1 – 5; 2 – 10

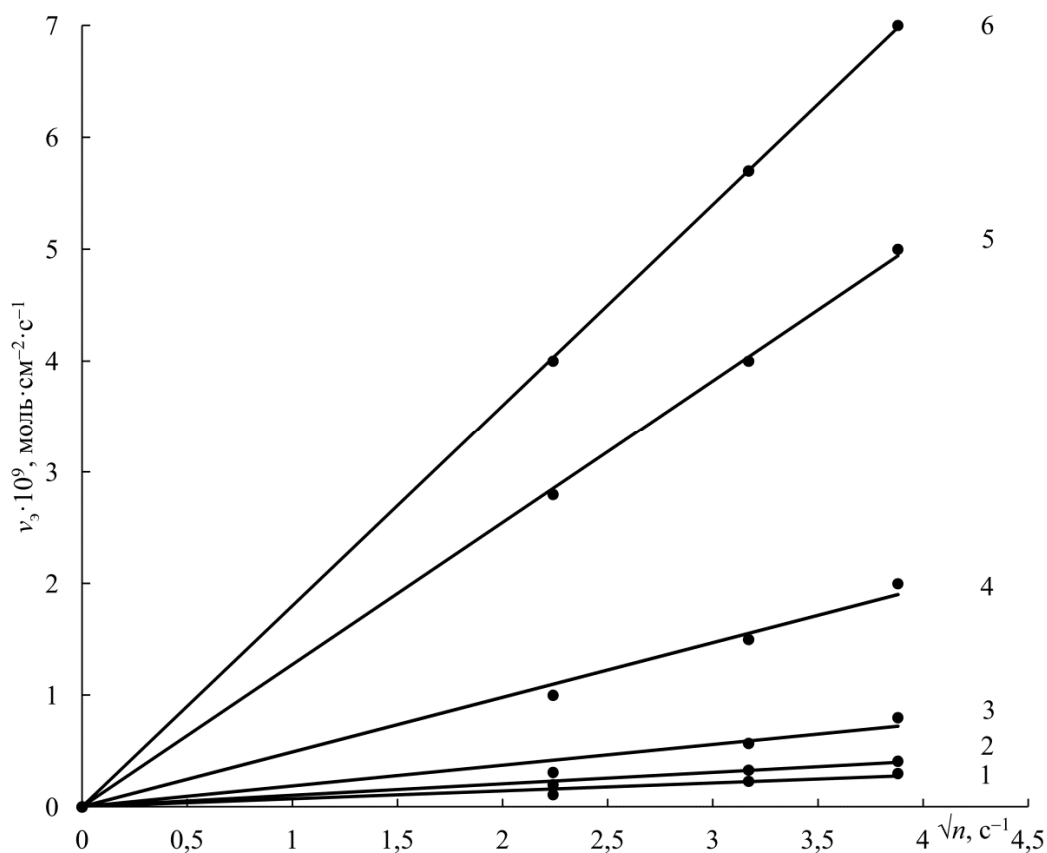


Рис. 3. Зависимость скорости растворения феррита цинка (v_3) от оборотов диска (\sqrt{n}) при $T = 25$ °С и различной концентрации серной кислоты, г/дм³: 1 – 7; 2 – 15; 3 – 40; 4 – 100; 5 – 200; 6 – 300
Fig. 3. Dependence of the dissolution rate of zinc ferrite (v_3) on disk revolutions (\sqrt{n}) at $T = 25$ °С and different concentrations of sulfuric acid, g/dm³: 1 – 7; 2 – 15; 3 – 40; 4 – 100; 5 – 200; 6 – 300

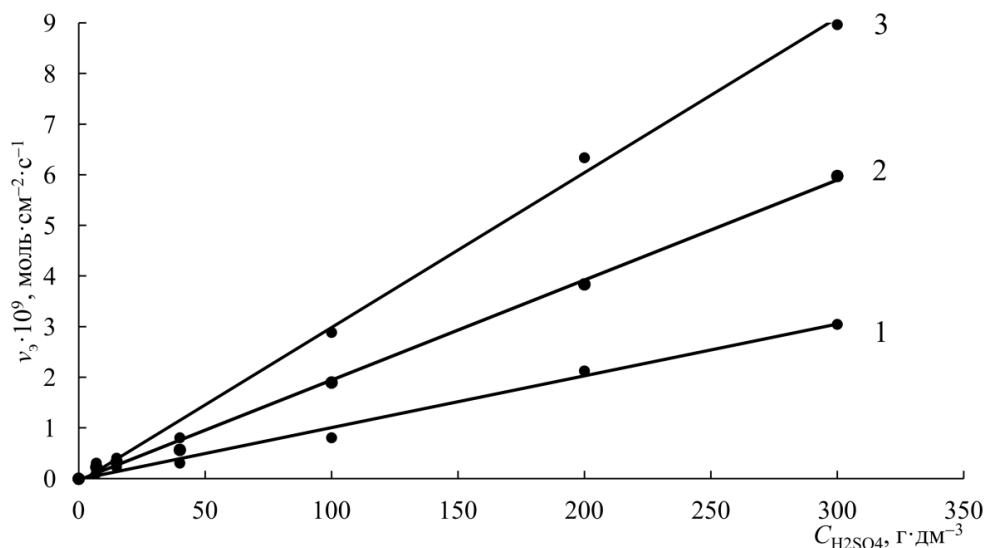


Рис. 4. Зависимость скорости растворения феррита цинка (v_3) от концентрации серной кислоты при $T = 25$ °С при различных оборотах диска, c^{-1} : 1 – 5; 2 – 10; 3 – 15

Fig. 4. Dependence of the dissolution rate of zinc ferrite (v_3) on the concentration of sulfuric acid at $T = 25$ °С at different disk speeds, s^{-1} : 1 – 5; 2 – 10; 3 – 15

Расчет экспериментальной удельной скорости растворения феррита цинка

Таблица 1

Calculation of the experimental specific rate of dissolution of zinc ferrite

Table 1

Условия эксперимента			$v \cdot 10^5$, г·мин ⁻¹	A , г·моль ⁻¹	Диаметр образца, см	S , см ²	$v_3 \cdot 10^9$ моль·см ⁻² ·с ⁻¹
$C_{H_2SO_4}$, г·дм ⁻³	T , К	n , с ⁻¹					
7	298	5	0,16	65,38	2,2	3,8	0,11
	318	5	0,79				0,53
	338	5	0,8				0,54
	298	10	0,35				0,23
	318	10	1,02				0,68
	338	10	1,1				0,74
	298	15	0,58				0,39
	318	15	1,07				0,72
	338	15	1,53				1,02
15	298	5	0,35				0,23
	318	5	0,8				0,54
	338	5	0,9				0,6
	298	10	0,49				0,33
	318	10	1,3				0,87
	338	10	1,13				0,76
	298	15	0,73				0,49
	318	15	1,53				1,02
	338	15	2,07				1,39
40	298	5	0,46				0,31
	318	5	1,75				1,17
	338	5	2,25				1,51
	298	10	0,85				0,57
	318	10	1,95				1,31
	338	10	2,5				1,68
	298	15	1,2				0,81
	318	15	2,4				1,61
	338	15	3,47				2,32

Окончание табл. 1
Table 1 (end)

Условия эксперимента			$v \cdot 10^5$, г·мин ⁻¹	A , г·моль ⁻¹	Диаметр образца, см	S , см ²	$v_3 \cdot 10^9$ моль·см ⁻² ·с ⁻¹
$C_{H_2SO_4}$, г·дм ⁻³	T , К	n , с ⁻¹					
100	298	5	0,57		1,5	1,77	0,81
	298	10	1,32				1,9
	298	15	2,01				2,89
200	298	5	1,48				2,13
	298	10	2,67				3,84
	298	15	4,41				6,34
300	298	5	2,12				3,05
	298	10	4,15				5,98
	298	15	6,23				8,97

концентрациях H_2SO_4 100–300 г/дм³, скорости растворения определяли при $T = 298, 318$ и 338 К и концентрации H_2SO_4 7, 15, 40 г/дм³. Скорость вращения диска при этом составляла 15 с⁻¹. Повышение температуры раствора увеличивает скорость растворения феррита цинка. По найденным скоростям построены графики зависимости v_3 от температуры (рис. 5).

По зависимости скорости растворения феррита цинка от температуры по уравнению Аррениуса рассчитаны значения экспериментальной (кажущейся) энергии активации процесса растворения феррита цинка в водном растворе серной кислоты E_a (табл. 2, рис. 6).

При расчетах приняли частоту вращения диска 15 с⁻¹, концентрацию H_2SO_4 40 г·дм⁻³.

$$E_a = -2,3 \cdot R \cdot \text{tg} \varphi, \quad (3)$$

где E_a – кажущаяся энергия активации, кДж·моль⁻¹; R – универсальная газовая постоянная, $8,314$ Дж·моль⁻¹·град⁻¹; $\text{tg} \varphi$ – численное значение тангенса угла наклона прямой зависимости $\lg K_3 - 1000/T$ (см. рис. 6).

$$\lg K_3 = \lg \left(v / (S \cdot C \cdot n^{0,5}) \right), \quad (4)$$

где $\lg K_3$ – экспериментальная константа скорости; v – экспериментальная скорость процесса, моль·см⁻²·с⁻¹; C – концентрация растворителя, моль·мл⁻¹; n – частота вращения диска, с⁻¹.

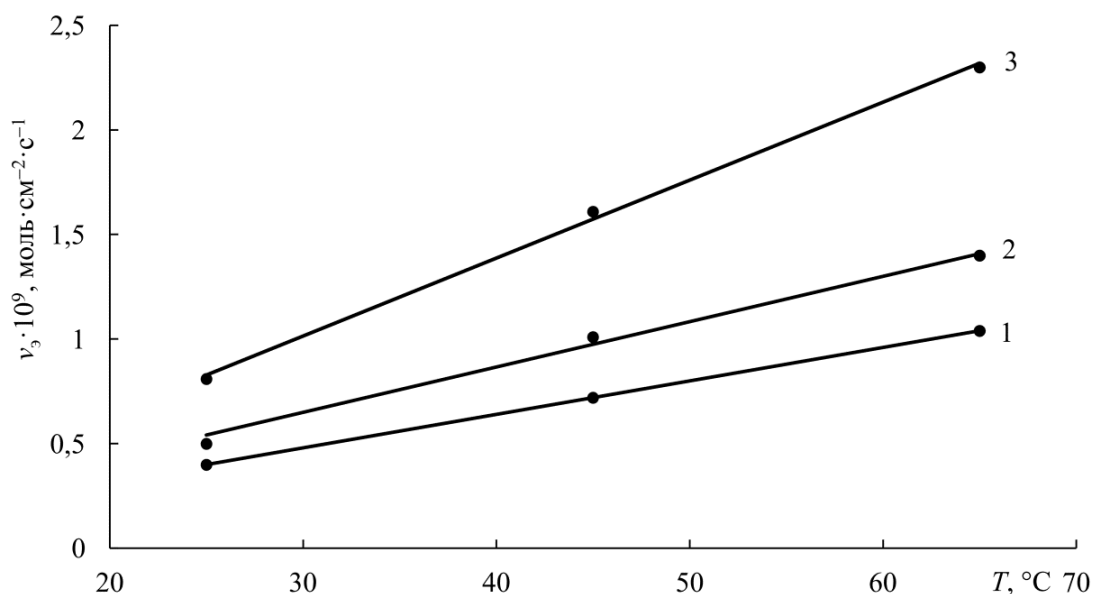


Рис. 5. Зависимость скорости растворения феррита цинка (v_3) от температуры при $n = 15$ с⁻¹ и различной $C_{H_2SO_4}$, г·дм⁻³: 1 – 7; 2 – 15; 3 – 40

Fig. 5. Dependence of the dissolution rate of zinc ferrite (v_3) on temperature at $n = 15$ s⁻¹ and various $C_{H_2SO_4}$, g·дм⁻³: 1 – 7; 2 – 15; 3 – 40

Таблица 2

Расчет экспериментальной (кажущейся) энергии активации растворения феррита цинка

Table 2

Calculation of experimental (apparent) activation energy for dissolution of zinc ferrite

T, K	$v_3 \cdot 10^9, \text{ моль} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	$\lg K_3$	$E_a, \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$
298	0,81	-12,871	9,5
318	1,61	-12,572	
338	2,32	-12,414	

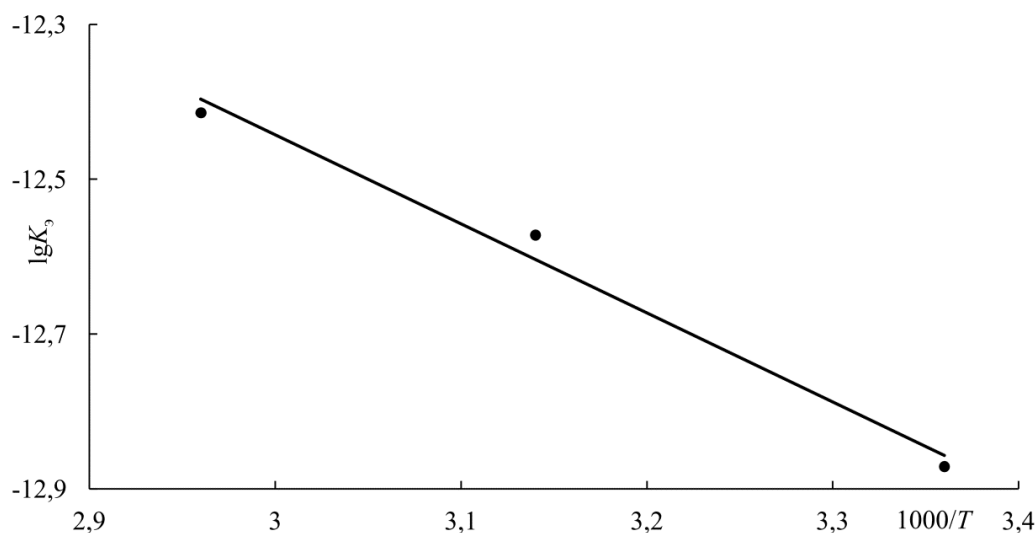


Рис. 6. Зависимость экспериментальной константы скорости ($\lg K_3$) от обратной температуры ($1000/T$)

Fig. 6. Dependence of the experimental rate constant ($\lg K_3$) on the inverse temperature ($1000/T$)

Таблица 3

Расчет порядка реакции растворения феррита цинка по серной кислоте, $n = 15 \text{ с}^{-1}$

Table 3

Calculation of the reaction order of dissolution of zinc ferrite with sulfuric acid, $n = 15 \text{ s}^{-1}$

T, K	$C_{\text{H}_2\text{SO}_4}, \text{ г/дм}^3$	$v_3 \cdot 10^9, \text{ моль} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	$\lg(C_2/C_1)$	$\lg(v_2/v_1)$	m	Среднее значение m
298	7	0,39	1,63	1,36	0,83	0,59
	300	8,97				
318	7	0,72	0,75	0,35	0,47	
	40	1,61				
338	7	1,02	0,75	0,36	0,48	
	40	2,32				

Скорость растворения феррита цинка с повышением концентрации серной кислоты, температуры и скорости вращения образца увеличивается. Экспериментальная энергия активации определена равной менее $10 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$ ($2,39 \text{ ккал} \cdot \text{моль}^{-1}$). Из этого следует, что реакция растворения феррита цинка протекает в диффузионном режиме. Исходя из коэффициентов диффузии H_2SO_4 и ZnSO_4 $2,65$ и $0,78 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ соответственно, можно сделать предположение, что диффузионный про-

цесс контролируется скоростью отвода продукта реакции ZnSO_4 от поверхности диска в объем раствора. Также известно, что при увеличении концентрации цинка и железа в растворе скорость растворения феррита цинка снижается [7]. Порядок реакции по серной кислоте близок к 1 (табл. 3).

Результаты расчета экспериментальной константы скорости растворения феррита цинка по формулам (5) и (6) представлены в табл. 4.

Расчет экспериментальной константы скорости растворения феррита цинка

Таблица 4

Table 4

Calculation of the experimental rate constant for the dissolution of zinc ferrite

Условия эксперимента			$v_3 \cdot 10^9$ моль·см ⁻² ·с ⁻¹	E_a , Дж·моль ⁻¹	$K_3 \cdot 10^7$, см ⁻² ·с ^{-0,5}	$K_0 \cdot 10^5$, см ⁻² ·с ^{-0,5}
$C_{H_2SO_4}$, г·дм ⁻³	T , К	n , с ⁻¹				
7	298	5	0,11	9500	1,82	0,84
	318	5	0,53		8,77	3,19
	338	5	0,54		8,94	2,63
	298	10	0,23		2,69	1,24
	318	10	0,68		7,95	2,89
	338	10	0,74		8,65	2,54
	298	15	0,39		3,73	1,73
	318	15	0,72		6,88	2,5
	338	15	1,02		9,74	2,86
15	298	5	0,23		1,77	0,82
	318	5	0,54		4,15	1,51
	338	5	0,6		4,61	1,35
	298	10	0,33		1,79	0,83
	318	10	0,87		4,72	1,72
	338	10	0,76		4,12	1,21
	298	15	0,49		2,17	1,0
	318	15	1,02		4,52	1,64
40	338	15	1,39		6,16	1,81
	298	5	0,31		0,89	0,41
	318	5	1,17		3,37	1,22
	338	5	1,51		4,35	1,28
	298	10	0,57	1,16	0,54	
	318	10	1,31	2,67	0,97	
	338	10	1,68	3,42	1,0	
	298	15	0,81	1,35	0,62	
100	318	15	1,61	2,68	0,97	
	338	15	2,32	3,86	1,13	
	298	5	0,81	2,01	0,93	
200	298	10	1,9	3,33	1,54	
	298	15	2,89	4,13	1,91	
	298	5	2,13	2,64	1,22	
300	298	10	3,84	3,36	1,55	
	298	15	6,34	4,54	2,1	
	298	5	3,05	2,52	1,17	
	298	10	5,98	3,49	1,61	
	298	15	8,97	4,28	1,98	

$$K_3 = v_3 / (S \cdot C_{H_2SO_4} \cdot n^{0,5}), \quad (5)$$

где K_3 – константа скорости, см·с^{-0,5}; v_3 – скорость растворения феррита меди, моль·см⁻²·с⁻¹; $C_{H_2SO_4}$ – концентрация растворителя, моль·дм⁻³; $n^{0,5}$ – скорость вращения диска, с⁻¹.

$$K_0 = K_3 / \exp(-E_a / RT), \quad (6)$$

где K_0 – константа скорости в кинетическом уравнении, см⁻²·с^{-0,5}.

По результатам обработки опытов, проведенных в различных условиях, значения K_0 для диффузионного режима растворения феррита цинка составили $(1,51 \pm 0,55) \cdot 10^{-5}$ см⁻²·с^{-0,5}.

Общий вид кинетического уравнения:

$$v = K_0 \cdot C^m \cdot n^{0,5} \cdot \exp(-E/RT), \quad (7)$$

где v – удельная скорость растворения, моль/см²·с; K_0 – константа скорости, дм³·см⁻²·с⁻¹; m – порядок реакции по раство-

рителю; C – концентрация растворителя, моль/дм³; E – кажущаяся энергия активации, Дж/моль; R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·град.) (8,314); T – температура, К.

Кинетическое уравнение процесса растворения феррита цинка:

$$v = 1,51 \cdot 10^{-5} \cdot C^1 \cdot n^{0,5} \cdot \exp(-E/RT), \quad (8)$$

Полученные данные о необходимости использования повышенной температуры, концентрации серной кислоты и интенсивности массообмена учтены при последующей разработке технологической схемы переработки хвостов флотации гидрометаллургическим способом.

Выводы

1. Растворение феррита цинка в серной кислоте протекает согласно закономерностям диффузионного режима. Экспериментальная

энергия активации определена равной менее 8 кДж/моль. Скорость растворения феррита с повышением концентрации серной кислоты, температуры и скорости массообмена увеличивается. Среднее значение порядка реакции растворения феррита цинка по серной кислоте равно 0,59.

2. Растворение ферритов меди и цинка удовлетворительно описывается кинетическими уравнениями в условиях:

– температура 298–338 К;

– концентрация кислоты 7–300 г/дм³;

– частота вращения диска 5,6–9,7 рад·с⁻¹;

3. Установление режимов растворения феррита цинка позволяет выбрать направление технологических исследований по выщелачиванию хвостов флотации с повышенными температурой процесса и концентрацией серной кислоты.

Список литературы

1. Изучение кинетики растворения феррита меди методом вращающегося диска / Д.С. Реутов, Б.Д. Халезов, Л.А. Овчинникова, А.С. Гаврилов // Цветные металлы. 2018. № 9. С. 29–32. DOI: 10.17580/tsm.2018.09.03
2. Изучение скорости растворения ферритов меди и цинка методом вращающегося диска / Д.С. Реутов, Б.Д. Халезов, Л.А. Овчинникова, А.С. Гаврилов // Бутлеровские сообщения. 2018. Т. 54. № 5. С. 56–62.
3. Изучение кинетики растворения феррита цинка методом вращающегося диска / Д.С. Реутов, Б.Д. Халезов, Л.А. Овчинникова, А.С. Гаврилов // Цветные металлы. 2017. № 11. С. 12–15. DOI: 10.17580/tsm.2017.11.02
4. Халезов Б.Д. Кучное выщелачивание медных и медно-цинковых руд. Екатеринбург: РИО УрО РАН, 2013. 332 с.
5. К вопросу рационального использования отходов переработки медеплавильных шлаков / А.Л. Котельникова, В.Ф. Рябинин, Г.Г. Кориневская и др. // Недропользование XXI век. 2014. № 6 (50). С. 14–19.
6. Кинетика растворения сфалерита / Б.Д. Халезов, И.А. Каковский, Ю.С. Рыбаков, Е.В. Дятчина // Вопросы теории и практики геотехнологии цветных металлов: сб. науч. тр. ин-та «Гидроцветмет». Новосибирск, 1990. С. 93–102.
7. Каковский И.А., Набойченко С.С. Термодинамика и кинетика гидрометаллургических процессов. Алма-Ата: Наука, 1986. 146 с.
8. Набойченко С.С., Лобанов В.Г. Практикум по гидрометаллургии: учеб. пособие для вузов. М.: Металлургия, 1992. 336 с.

References

1. Reutov D.S., Khalezov B.D., Ovchinnikova L.A., Gavrilo A.S. Study of the kinetics of dissolution of copper ferritic by the rotating disk method. *Tsvetnye metall*. 2018;9:29–32. (In Russ.) DOI: 10.17580/tsm.2018.09.03
2. Reutov D.S., Khalezov B.D., Ovchinnikova L.A., Gavrilo A.S. Study of the dissolution rates of copper and zinc ferrites using the rotating disk method. *Butlerov Communications*. 2018;54(5):56–62.
3. Reutov D.S., Khalezov B.D., Ovchinnikova L.A., Gavrilo A.S. Investigation of zinc ferrite dissolution kinetics by roll-disc method. *Tsvetnye metall*. 2017;11:12–15. (In Russ.) DOI: 10.17580/tsm.2017.11.02

4. Khalezov B.D. *Kuchnoe vyshchelachivanie mednykh i medno-tsinkovykh rud* [Heap Leaching of Copper and Copper-Zinc Ores]. Ekaterinburg: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences Publishing; 2013. 332 p. (In Russ.)

5. Kotelnikova A.L., Ryabinin V.F., Korynevskaya G.G., Halezov B.D., Ryeutov D.S., Mouftachov V.A. To the rational use of copper slag processing tails. *Nedropolzovanie XXI vek.* 2014;6(50):14–19. (In Russ.)

6. Khalezov B.D., Kakovsky I.A., Rybakov Yu.S., Dyatchina E.V. [Kinetics of sphalerite dissolution]. In: *Issues of theory and practice of geotechnology of non-ferrous metals. Proceedings of the HydroMet Institute.* Novosibirsk; 1990. P. 93–102. (In Russ.)

7. Kakovskiy I.A., Naboychenko S.S. *Termodinamika i kinetika gidrometallurgicheskikh protsessov* [Thermodynamics and kinetics of hydrometallurgical processes]. Alma-Ata: Nauka Publ.; 1986. 146 p. (In Russ.)

8. Naboychenko S.S., Lobanov V.G. *Praktikum po gidrometallurgii: ucheb. posobie dlya vuzov* [Hydrometallurgy Practicum. A textbook for universities]. Moscow: Metallurgiya Publ.; 1992. 336 p. (In Russ.)

Информация об авторах

Реутов Дмитрий Сергеевич, научный сотрудник лаборатории гетерогенных процессов, Институт металлургии Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия; reutov-ds@mail.ru.

Крашенинин Алексей Геннадьевич, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией гетерогенных процессов, Институт металлургии Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия; agkrash@mail.ru.

Гаврилов Алексей Сергеевич, канд. техн. наук, научный сотрудник лаборатории гетерогенных процессов, Институт металлургии Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия; gavrilov_208.90@mail.ru.

Алешин Дмитрий Сергеевич, младший научный сотрудник лаборатории гетерогенных процессов, Институт металлургии Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия; dmitriy.aleshin1@yandex.ru.

Information about the authors

Dmitry S. Reutov, Researcher at the Laboratory of Heterogeneous Processes, Institute of Metallurgy of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia; reutov-ds@mail.ru.

Alexey G. Krashenin, Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher, Head of the Laboratory of Heterogeneous Processes, Institute of Metallurgy of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia; agkrash@mail.ru.

Alexey S. Gavrilov, Cand. Sci. (Eng.), Researcher at the Laboratory of Heterogeneous Processes, Institute of Metallurgy of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia; gavrilov_208.90@mail.ru.

Dmitry S. Aleshin, Junior Researcher at the Laboratory of Heterogeneous Processes, Institute of Metallurgy of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia; dmitriy.aleshin1@yandex.ru.

Статья поступила в редакцию 13.08.2023

The article was submitted 13.08.2023