

## МЕТАЛЛУРГИЯ

Научная статья

УДК 544.42:542.61:546.47

EDN: UHVJQT

DOI: 10.21285/1814-3520-2024-1-178-189



## Кинетические закономерности выщелачивания цинка из промпродуктов

С.А. Якорнов<sup>1✉</sup>, Г.И. Мальцев<sup>2</sup>, Р.С. Воинков<sup>3</sup>, А.А. Гребнева<sup>4</sup><sup>1</sup>ОАО «Уральская горно-металлургическая компания», г. Верхняя Пышма, Россия<sup>2-4</sup>Акционерное общество «Уралэлектромедь», г. Верхняя Пышма, Россия<sup>3</sup>Технический университет Уральской горно-металлургической компании, г. Верхняя Пышма, Россия

**Резюме.** Целью работы являлось изучение кинетических закономерностей выщелачивания цинка из соединения  $\text{CaO}\cdot\text{ZnO}$ , образующегося при спекании пыли электродуговых печей с известняком, а также выявление механизмов, по которым протекают химические взаимодействия. Объектом исследования служил спек пыли электродуговых печей с известняком, полученный на Челябинском цинковом заводе. Установлено, что цинк в спеке содержится в виде легкорастворимого  $\text{CaO}\cdot\text{ZnO}$ . Элементный состав исходных пылей и спека с известняком определяли спектральным атомно-эмиссионным способом с использованием различных источников возбуждения спектра: индуктивно-связанной плазмы на оптико-эмиссионном приборе «Spectroblue»; искровой спектрометрии. Фазовый состав материалов изучали на рентгенофазовом дифрактометре «Bruker D8 Advance». Исходный спек измельчали до порошкообразного состояния с размером частиц  $\sim 0,04$  мм и выходом  $\sim 97\%$ -го состава, %: 11,9 Zn; 28,5 Ca; 16,6 Fe; 0,38 Mg; 0,14 Pb;  $< 0,05$  Cl. Опыты по выщелачиванию Zn раствором едкого натра проводили при следующих параметрах: исходная концентрация цинка в пульпе была  $0,202$  г-ион/дм<sup>3</sup>; концентрация щелочи –  $5\text{--}9$  моль/дм<sup>3</sup> NaOH; Ж:Т = 9:1; скорость перемешивания пульпы –  $10\text{--}20$  рад·с<sup>-1</sup>; температура –  $333\text{--}363$  К; продолжительность –  $0,5\text{--}2,5$  ч. Показано, что цинк из спека переходит в раствор в виде тетрагидроксоцинката натрия  $\text{Na}_2[\text{Zn}(\text{OH})_4]$ , а кальций остается в кеке, в основном в виде малорастворимого гидроксида  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , который взаимодействует с углекислым газом с образованием нерастворимого карбоната кальция  $\text{CaCO}_3$ . Установлено, что процесс выщелачивания цинка из спека соответствует внешнедиффузионному режиму взаимного переноса исходных реагентов и продуктов реакции через поверхностный слой жидкости на границе раздела фаз «жидкость–твердое» с величиной энергии активации равной  $12,44$  кДж/моль. Таким образом, при исследованных параметрах выщелачивания цинка раствором NaOH процесс протекает во внешнедиффузионном режиме. Представляет интерес выявление условий, соответствующих внутридиффузионному и кинетическому режимам выщелачивания цинка.

**Ключевые слова:** пыли электродуговых печей, известняк, обжиг, цинк, выщелачивание, едкий натр

**Для цитирования:** Якорнов С.А., Мальцев Г.И., Воинков Р.С., Гребнева А.А. Кинетические закономерности выщелачивания цинка из промпродуктов // iPolytech Journal. 2024. Т. 28. № 1. С. 178–189. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-1-178-189>. EDN: UHVJQT.

## METALLURGY

Original article

## Kinetics of zinc leaching from intermediate feedstocks

Sergey A. Yakornov<sup>1✉</sup>, Gennady I. Maltsev<sup>2</sup>, Roman S. Voinkov<sup>3</sup>, Anna A. Grebneva<sup>4</sup><sup>1</sup>Ural Mining & Metallurgical Company, Verkhnyaya Pyshma, Russia<sup>2-4</sup>Joint Stock Company Uralelectromed, Verkhnyaya Pyshma, Russia<sup>3</sup>Technical University of the Ural Mining and Metallurgical Company, Verkhnyaya Pyshma, Russia

**Abstract.** The aim of the work was to study the leaching kinetics of zinc from the compound  $\text{CaO}\cdot\text{ZnO}$ , formed during the sintering of dust from electric arc furnaces with limestone, as well as to identify the mechanisms by means which such chemical interactions occur. The object of the study was the dust sinter of electric arc furnaces with limestone obtained at the Chelyabinsk Zinc Plant. It was found that zinc is contained in sinter in the form of readily soluble  $\text{CaO}\cdot\text{ZnO}$ . The elemental composition of the initial dusts and sinter was determined by the spectral atomic emission method using inductively coupled plasma on a Spectroblue optical emission device and spark spectrometry. The phase composition of the materials was studied on a Bruker D8 Advance X-ray diffractometer. The initial sinter was milled to a

powder state having a particle size of ~0.04 mm and with a yield of ~97% of the composition, %: 11.9 Zn; 28.5 Ca; 16.6 Fe; 0.38 Mg; 0.14 Pb; 0.05 Cl. Experiments on the leaching of Zn with NaOH solution were carried out at the following parameters: the initial concentration of zinc in the pulp was 0.202 g-ion/dm<sup>3</sup>; alkali concentration – 5–9 mol/dm<sup>3</sup> NaOH; L:S = 9:1; pulp mixing rate – 10–20 rad·c<sup>-1</sup>; temperature – 333–363 K; duration – 0.5–2.5 hours. It has been shown that zinc from sinter passes into solution as sodium tetrahydroxozincate Na<sub>2</sub>[Zn(OH)<sub>4</sub>], while calcium remains in the cake, mainly as insoluble Ca(OH)<sub>2</sub>, which reacts with carbon dioxide to form insoluble calcium carbonate CaCO<sub>3</sub>. The process of dissolving zinc from the sinter corresponds to the external diffusion mode of mutual transfer of the initial reagents and reaction products through the surface layer of the liquid at the interface of the “liquid–solid” phases with an activation energy value equal to 12.44 kJ/mol. Thus, with the studied parameters of zinc leaching with NaOH solution, the process proceeds in an external diffusion mode. The results are of interest when identifying conditions corresponding to the intradiffusion and kinetic modes of zinc leaching.

**Keywords:** electric arc furnace dust, limestone, roasting, zinc, leaching, caustic soda

**For citation:** Yakornov S.A., Maltsev G.I., Voinkov R.S., Grebneva A.A. Kinetics of zinc leaching from intermediate feedstocks. *iPolytech Journal*. 2024;28(1):178-189. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-1-178-189>. EDN: UHVJQT.

## ВВЕДЕНИЕ

Переработка вторичного металлургического сырья представляет значительный интерес наряду с рудными материалами, поскольку позволяет минимизировать капитальные и технологические расходы, снизить экологические риски, что определяет актуальность исследуемой темы [1]. Цинксодержащие продукты металлургического производства представляют высокую экологическую опасность, оставаясь потенциальным альтернативным источником цинка и сопутствующих металлов. Для извлечения цинка широко используют гидрометаллургическую переработку техногенного сырья [2]. Оксид цинка достаточно легко растворяется в интервале pH 2–4. Концентрация Zn<sup>2+</sup> в неподвижной среде на поверхности частиц ZnO значительно ниже, чем его растворимость. Вероятно, гидроксидные анионы, высвобождающиеся при растворении, накапливаются на поверхности положительно заряженной поверхности ZnO, и кинетика растворения в основном контролируется диффузией ионов H<sup>+</sup> из объема раствора к поверхности ZnO [3]. Крупные частицы ZnO переходят в раствор в процессе, ограниченном реакцией в соответствии с их удельной поверхностью. Мелкие агрегированные частицы растворяются в 2 этапа: ограниченное реакцией растворения на поверхности первичных частиц ZnO с последующей диффузией в неподвижной жидкой среде между первичными частицами в перемешиваемую объемную водную среду. Предложена реакционно-диффузионная модель кинетики [4]. Для переработки Zn-Co шлака предлагается разделение цинка и кобальта с использованием ионной жидкости, функционализированной карбоксилами ([Hbet][Tf<sub>2</sub>N]).

Степень перехода в раствор оксида цинка составляет 92,6% при 90°C и 60 мин, тогда как выщелачивание из шлака кобальта (5,37%) и марганца (0,05%) незначительно [5]. В сопоставимых условиях растворимость ZnSO<sub>4</sub> выше, чем ZnO [6]. Пыль электродуговых печей перерабатывают различными способами: смешивают с поливинилхлоридом и подвергают термической обработке при температуре 300°C в потоке воздуха с последующей обработкой твердого остатка в воде при pH 5,6 и температуре 50°C, что привело к 100%-му извлечению цинка в раствор выщелачивания при оптимальных условиях, в то время как извлечение железа было близко к 0% [7]; предлагается извлечение цинка и отделение железа в одну стадию путем совместного обжига пыли с NH<sub>4</sub>HSO<sub>4</sub> с последующей обработкой водой, оптимальными условиями были массовое соотношение NH<sub>4</sub>HSO<sub>4</sub>/EAFD, равное 0,75, температура обжига 600°C, время выдержки 3 ч и время выщелачивания 1 ч, при котором извлекалось в раствор 91,14% Zn и 3,25% Fe [8]. Для селективного отделения и извлечения цинка из доменной пыли предложено: а) выщелачивание раствором NH<sub>4</sub>Cl, когда ZnO и ZnSO<sub>4</sub> преобразуют в координационные соединения цинк-хлор (ZnCl<sub>2-i</sub>, i = 1,2,3,4) при совместном действии ионов NH<sub>4</sub><sup>+</sup> и Cl<sup>-</sup>, степень выщелачивания цинка достигла 85,64% [9]; б) выделение Zn и Fe/C с помощью системы «хлористый натрий-хлористый водород-вода»; количественное разделение и извлечение Zn и Fe/C достигнуто с помощью хлористого цинка (ZnCl<sub>2-i</sub> (i = 0, 1, 2, 3, 4)) по методике совместного выщелачивания с использованием 3 моль/дм<sup>3</sup> NaCl при pH = 4, соотношении Ж/Т = 4, температуре 70°C, концентрации HCl 0,25 моль/дм<sup>3</sup> и продолжи-

тельности 2 ч; степень выщелачивания цинка составила 93,2% [10].

Цинк в конвертерной пыли присутствует в виде инертного  $\text{ZnFe}_2\text{O}_4$ , что затрудняет его выщелачивание. Представлен метод кислородного выщелачивания под давлением для селективного выщелачивания Zn из пыли. При этом процессе эффективно стимулируется разложение  $\text{ZnFe}_2\text{O}_4$ , кроме того,  $\text{Fe}^{2+}$  в растворе окисляется и гидролизуется до твердого  $\text{Fe}(\text{OH})\text{SO}_4$ . При оптимальных условиях эффективность выщелачивания цинка достигала 98,8%, а в кеке оставалось 86,3% Fe, что обеспечивает разделение Zn и Fe [11]. Шлаковая германийсодержащая пыль содержит 49,65% Zn и обрабатывается путем кислотного выщелачивания, обогащенного кислородом, в ультразвуковой среде. Степень выщелачивания Zn и Ge достигает 96,66% и 92,96%, что на 4,92% и 9,80% выше, чем при обычном методе кислотной обработки пыли, соответственно, благодаря хорошему синергетическому эффекту ультразвука и кислорода. Процесс выщелачивания цинка и германия контролируется смешанным режимом диффузии и химической реакции, а энергии активации Zn и Ge составляют 14,996 и 23,133 кДж/моль соответственно. Ультразвук в сочетании с кислородным выщелачиванием может улучшить кинетику и снизить энергию активации реакции [12].

Выщелачивание галлия и цинка из корундовой дымовой пыли показало, что при концентрации серной кислоты 25 масс. %  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , температуре 90°C и продолжительности 50 мин эффективность выщелачивания Ga и Zn может быть увеличена с 62,78 до 82,5%, и с 94,43 до 99,57% – при использовании ультразвука соответственно. Кинетический анализ показал, что выщелачивание Ga из пыли контролируется смесью диффузионных и химических реакций, а выщелачивание Zn контролируется диффузией [13]. Предложено серноокислотная обработка феррита цинка с порошком меди. Продолжительность полного разложения феррита цинка составила 10 мин при 80°C в условиях: молярное соотношение меди и феррита цинка 1,5; 100 г/дм<sup>3</sup>  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ; Ж/Т = 30 см<sup>3</sup>/г; порошок меди 27,15% фракции +38,5–20 мкм. Процесс контролируется поверхностной химической реакцией; кажущиеся энергии активации для Zn, Fe и Cu составляют 56, 56 и 50 кДж/моль соответственно [14]. Для повышения извлечения цинка из Zn-пыли использован селективный восстановительный обжиг при 600°C, для

разложения феррита  $\text{ZnFe}_2\text{O}_4$  с получением кислоторастворимого ZnO, который сочетался с выщелачиванием водой при Ж/Т = 10; 80 г/дм<sup>3</sup>  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ; степень выщелачивания составила 92,24%, по сравнению с 87,76% при прямом выщелачивании [15]. Оптимальные условия выщелачивания пыли оксида цинка путем окисления озоном в серноокислотной системе составили: продолжительность озонирования 10 мин; температура выщелачивания 90°C; начальная кислотность 160 г/дм<sup>3</sup>; продолжительность выщелачивания 60 мин; Ж/Т = 7.

При оптимальных условиях степень выщелачивания, %: 95,79 Zn; 93,65 Ge [16]. Изучено гидротермальное аммиачное выщелачивание Zn из пылей вторичного ZnO; в раствор перешел преимущественно оксид цинка; добавка аммонийной соли способствовала выщелачиванию сульфида цинка; выщелачивание цинка составило 93,4% при оптимальных условиях [17]. Селективно выщелачивают цинк из низкосортного карбонатного сырья с использованием экологически безопасного реагента – глицина. При оптимальных условиях наблюдались: концентрация глицина 1,5 М; pH 9,5; температура 70°C. Выщелачивалось более 90% Zn при незначительном извлечении основных примесей [18]. Разработан новый процесс восстановительного выщелачивания индийсодержащего цинкового остатка с использованием галенита в качестве восстановителя для интенсивного растворения Zn и In. Лимитирует процесс поверхностная химическая реакция – кажущаяся энергия активации выщелачивания In составила 64 кДж/моль, порядок реакции равен –0,34 и 1,47 в зависимости от размера частиц и начальной концентрации  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , соответственно. Степень выщелачивания, %: 87 Zn; 91 Fe; 88 In, через 90 мин при 85°C, начальная концентрация  $\text{H}_2\text{SO}_4$  140 г/дм<sup>3</sup>,  $\text{PbS}/\text{ZnFe}_2\text{O}_4 = 1$  моль/моль [19]. Разработан комбинированный процесс сульфидного обжига и выщелачивания цинка раствором HCl для обогащенного цинком шлама. Оптимальные условия: дозировка угольного порошка 15%; температура 700°C; продолжительность 60 мин. В этих условиях 95,48% цинка, содержащегося в остатках, было преобразовано в сульфиды; сульфат кальция был переведен в кальцит и сульфид кальция. Затем прокаленный образец подвергали выщелачиванию с HCl для отделения кальция и цинка.

Кальций на 93,75% был извлечен при оптимальных условиях: концентрация HCl

3 моль/дм<sup>3</sup>; Ж/Т = 5 см<sup>3</sup>/г; температура 25°C; продолжительность 10 мин. После выщелачивания HCl цинк на 97,37% был сконцентрирован в остатке выщелачивания с содержанием 45,86% Zn [20]. Фитоэкстракция была применена для извлечения цинка, свинца, никеля и кадмия растением *Amaranthus retroflexus*. Смесь из 25 масс. % остатка от выщелачивания цинка + 75 масс. % почвы была определена как оптимальное состояние. Индекс извлечения фитометаллов (отношение содержания металла в высушенном растении к содержанию металла в хвостах) в оптимальных условиях составил, %: 17,09 Zn; 7,60 Pb; 27,57 Ni; 59,05 Cd [21]. Изучалась эффективность выщелачивания умеренно термофильных консорциумов (*Leptospirillum ferriphilum* + *Acidithiobacillus caldus* + *Sulfobacillus benefaciens*) мелкодисперсной Pb-Zn сульфидной руды. Под действием этого консорциума скорость выщелачивания Zn достигла 96,4% за 8 дней и 100% через 12 дней. Бактериальное выщелачивание снижает потенциальную токсичность мелкодисперсной сульфидной руды-сырца для окружающей среды [22]. Остатки от выщелачивания цинка представляют собой отходы с трудоемкой обработкой, экологической опасностью и высоким выходом, их безвредная и экономичная переработка различными доступными методами представляет собой серьезную проблему. Представлен метод микрокристаллизации для переработки остатков выщелачивания цинка в стеклокерамику с хорошей производительностью и высоким выходом. Тяжелые металлы, содержащиеся в сырье, хорошо затвердели в стеклокерамике, что исключило высокую опасность тяжелых металлов и других компонентов для окружающей среды [23].

Целью выполненного исследования являлось выявление кинетических закономерностей выщелачивания цинка из CaO·ZnO, образующегося при спекании пыли электродуговых печей с известняком, выявление механизмов, по которым протекают химические взаимодействия, что может дать возможность наиболее эффективно влиять на скорость той или иной стадии процесса, минимизируя трудоемкость и материальные затраты.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования являлся спек пыли электродуговых печей с известняком, который получали для перевода цинка в лег-

корастворимую форму CaO·ZnO. Исходный материал измельчали на истирателе вибрационном лабораторном ИВС-4 до порошка с размером частиц ~0,04 мм и выходом ~97% состава, %: 11,9 Zn; 28,5 Ca; 16,6 Fe; 0,38 Mg; 0,14 Pb; < 0,05 Cl. Фазовый и гранулометрический составы измельченного Zn-содержащего материала приведены в табл. 1 и 2.

**Таблица 1.** Фазовый состав измельченного Zn-содержащего материала (данные рентгенофазового анализа (РФА))

**Table 1.** Phase composition of the crushed Zn-containing material (X-ray phase analysis data)

Химическая формула	Объемная доля фазы, %	Плотность, г/см <sup>3</sup>
Ca <sub>2</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	49	4,04
CaO	32	3,37
ZnO	9	5,61
Na <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	9	2,80
TeO <sub>2</sub>	1	5,67
SiO <sub>2</sub>	< 0,01	2,65

**Таблица 2.** Гранулометрический состав измельченного Zn-содержащего материала

**Table 2.** Granulometric composition of the crushed Zn-containing material

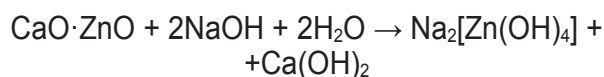
Крупность частиц	Содержание, %
Более 100 мкм (+0,1 мм)	3,01
От 71 до 100 мкм (– 0,1 + 0,071 мм)	3,04
От 40 до 71 мкм (– 0,071 + 0,040 мм)	15,75
Менее 40 мкм (–0,040 мм)	78,20

Для проведения экспериментов по выщелачиванию цинка использовали фракцию –0,1 мм, для которой по методике И 9106-13-2021 определили:

– плотность (истинная плотность, удельный вес) – 3,676 г/см<sup>3</sup> (расчетная ориентировочная плотность по данным РФА – 3,872 г/см<sup>3</sup>);

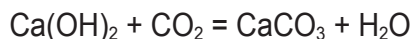
– насыпная плотность (насыпной вес, объемный вес) – 1,371 г/см<sup>3</sup>.

Опыты по выщелачиванию спека едким натром проводили при перемешивании пульпы в следующих диапазонах исследованных параметров процесса: 50 г масса навески спека; 5–9 моль/дм<sup>3</sup> NaOH; Ж:Т = 9:1; 70–90°C температура; 0,5–2,5 ч продолжительность. В результате цинк из состава спека переходил в раствор в виде тетрагидроксоцинката натрия, а кальций в основном оставался в малорастворимом остатке гидроксида:





Гидроксид кальция вступает во взаимодействие с углекислым газом и образует нерастворимый карбонат кальция и воду:



Элементный состав исходных пылей электродуговых печей и их спека с известняком определяли спектральным атомно-эмиссионным способом с использованием различных источников возбуждения спектра: индуктивно-связанная плазма на оптико-эмиссионном приборе «Spectroblue» (Spectro Analytical Instruments GmbH, Германия); искровой спектрометр «Spectrolab M12» (Spectro Analytical Instruments GmbH, Германия). Фазовый состав пылей и спека изучали на рентгенофазовом дифрактометре «Bruker D8 Advance» (Bruker AXS, Германия), оборудованном позиционно-чувствительным детектором «LynxEye» при следующих параметрах: углы дифракции  $2\theta = 15\text{--}80^\circ$  с шагом  $0,025^\circ$  за 1860 с; излучение  $\text{K}_\alpha\text{Co}$ ; продолжительность 7,5 ч; использование пакета «Bruker DiffracSuite EVA v6.0» и баз данных «ICDD PDF-2 (v. 2019)», а также «Crystallography Open Database».

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При гетерогенном растворении твердой фазы в жидкой взаимодействие включает внешне- и внутридиффузионный переносы исходных реагентов и продуктов реакции через жидкие и твердые слои, соответственно, на границе раздела фаз «жидкое–твердое»; собственно химическая реакция выщелачиваемого компонента с растворителем<sup>5</sup>.

Предварительными опытами были установлены минимальные значения параметров выщелачивания цинка, ниже которых существует исключительно внешедиффузионная область малоконцентрированных (разбавленных) систем, не позволяющая проводить кинетические исследования: концентрация  $\text{NaOH} \geq 2$  моль/дм<sup>3</sup>, скорость перемешивания пульпы  $\geq 10$  рад·с<sup>-1</sup>, температура  $\geq 298$  К, отношение  $\text{Ж:Т} \geq 3$ .

При проведении исследований использовали «метод начальных скоростей»<sup>5</sup>, позволяющий на первом этапе процесса раство-

рения нивелировать уменьшение суммарной поверхности дисперсной фазы в пульпе, увеличение плотности твердой оболочки продуктов реакции по мере их образования при относительном избытке реагента-растворителя<sup>6</sup> [24, 25].

Универсальным показателем процесса растворения целевого компонента является степень его выщелачивания ( $\alpha$ ):

$$\alpha = G_t / G_o,$$

где  $G_t$ ,  $G_o$  – количество цинка в растворе в момент времени ( $t$ ) и в исходной твердой фазе ( $t = 0$ ) соответственно.

Внешнедиффузионный режим процесса перевода в раствор, в нашем случае цинка, характеризуется следующими уравнениями:

$$\omega_c = d\alpha/dt = K_c \cdot S \cdot C_o^n;$$

$$\omega_v = d\alpha/dt = K_v \cdot S \cdot V^p;$$

$$\omega_T = d\alpha/dt = K_T \cdot S \cdot T^q,$$

где скорость перехода цинка в раствор ( $\omega_{c, v, T}$ , с<sup>-1</sup>) при продолжительности ( $t$ , с) в зависимости от концентрации растворителя ( $C_o$ , моль/дм<sup>3</sup>), скорости перемешивания пульпы ( $V$ , рад·с<sup>-1</sup>), температуры ( $T$ , К); константа скорости реакции ( $K_{c, v, T}$ ) при изменении соответствующего параметра; поверхность дисперсной фазы ( $S$ , дм<sup>2</sup>); порядок реакции по концентрации растворителя ( $n_c$ ); кажущиеся «порядки реакции» ( $p_v$ ,  $q_T$ ).

Значения  $n_c$ ,  $p_v$ ,  $q_T$  определяют по уравнениям:

$$n_c = \Delta \lg \omega / \Delta \lg C_{o(v, T)};$$

$$p_v = \Delta \lg \omega / \Delta \lg V;$$

$$q_T = \Delta \lg \omega / \Delta \lg T.$$

Продолжительность выщелачивания 50% цинка ( $\tau_{0,5}$ , с):

$$\tau_{0,5} = 0,23 \, r \alpha \delta / D \cdot C,$$

где радиус твердых частиц ( $r$ , дм); константа распределения ( $\alpha = N/n$ ), мольная доля растворителя в твердой фазе ( $N$ ), мольная доля выщелачиваемого цинка из твердой фазы ( $n$ ); толщина диффузной пленки ( $\delta$ , дм); коэффициент взаимодиффузии в растворе ( $D$ , дм<sup>2</sup>/г-ион·с); концентрация выщелачиваемого иона цинка в пульпе ( $C$ , г-ион/дм<sup>3</sup>).

<sup>5</sup>Мальцев Г.И. Комплексное извлечение попутных элементов из сырья металлургических предприятий Урала: дис. ... д-ра техн. наук: 05.16.02. Екатеринбург, 2011. С. 132, 133.

<sup>6</sup>Зеликман А.Н., Вольдман Г.М., Беляевская Л.В. Теория гидрометаллургических процессов: учеб. пособие. М.: Металлургия, 1983. 424 с.

**Таблица 3.** Показатели процесса обработки спека гидроксидом натрия  
**Table 3.** Indicators of cake treatment with sodium hydroxide

NaOH, моль/дм <sup>3</sup>	dα/dt, с <sup>-1</sup>	S, дм <sup>2</sup>	n <sub>c</sub>	C <sub>o</sub> <sup>n</sup>	K <sub>c</sub> , дм/моль·с
5	1,125·10 <sup>-3</sup>	547,1	1,47	10,72	1,48·10 <sup>-7</sup>
7	1,308·10 <sup>-3</sup>			17,61	
9	1,45·10 <sup>-3</sup>			25,50	

**Таблица 4.** Показатели щелочной переработки спека при различной скорости перемешивания пульпы  
**Table 4.** Indicators of cake alkaline treatment under different pulp mixing rates

V, рад/с	dα/dt, с <sup>-1</sup>	S, дм <sup>2</sup>	ρ <sub>v</sub>	V <sup>p</sup>	K <sub>v</sub> , 1/рад·дм <sup>2</sup>
10	0,967·10 <sup>-3</sup>	547,1	1,218	16,52	8,78·10 <sup>-8</sup>
15	1,158·10 <sup>-3</sup>			27,07	
20	1,45·10 <sup>-3</sup>			38,43	

**Таблица 5.** Показатели выщелачивания цинка при различной температуре пульпы  
**Table 5.** Zinc leaching rates at different pulp temperatures

T, К	dα/dt, с <sup>-1</sup> *)	q <sub>T</sub>	D, дм <sup>2</sup> /(г-ион)·с	K <sub>T</sub> , 1/дм <sup>2</sup> ·К·с	D <sub>o</sub>	E <sub>a</sub> , кДж/моль
333	1,0·10 <sup>-3</sup>	0,749	3,8·10 <sup>-12</sup>	1,59·10 <sup>-7</sup>	1,12·10 <sup>-8</sup>	12,44
343	1,15·10 <sup>-3</sup>		4,37·10 <sup>-12</sup>			
353	1,28·10 <sup>-3</sup>		4,876·10 <sup>-12</sup>			
363	1,45·10 <sup>-3</sup>		5,511·10 <sup>-12</sup>			

\*) – для начального участка кинетических кривых (α ≤ 0,3).

Скорость выщелачивания 50% цинка (ω<sub>0,5</sub>, с<sup>-1</sup>):

$$\omega_{0,5} = 0,5/t_{0,5}$$

Коэффициент взаимодиффузии в растворе (D):

$$D = (d\alpha/dt) \cdot \delta / C \cdot S;$$

$$D = D_0 e^{-E/kT},$$

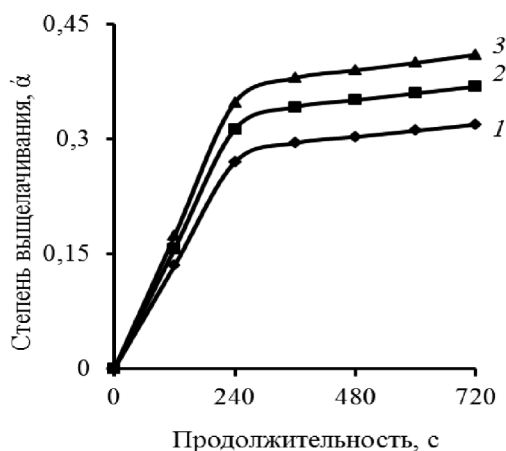
где предэкспоненциальный множитель (D<sub>0</sub>, дм<sup>2</sup>/г-ион·с); энергия активации (E, Дж); постоянная Больцмана (k).

$$E = 2,3RT_1T_2 \cdot \log(D_2/D_1) / (T_2 - T_1), \text{ Дж/моль}$$

$$E = 2,3Rt \cdot \text{tg}\gamma,$$

где тангенс угла наклона зависимости в координатах «logD–1/T»

$$[\text{tg}\gamma = \log(D_2/D_1)/(1/T_1 - 1/T_2)].$$



**Рис. 1.** Кинетические кривые выщелачивания цинка едким натром. NaOH, моль/дм<sup>3</sup>: 5 (1); 7 (2); 9 (3).  
V = 20 рад·с<sup>-1</sup>; T = 363 К

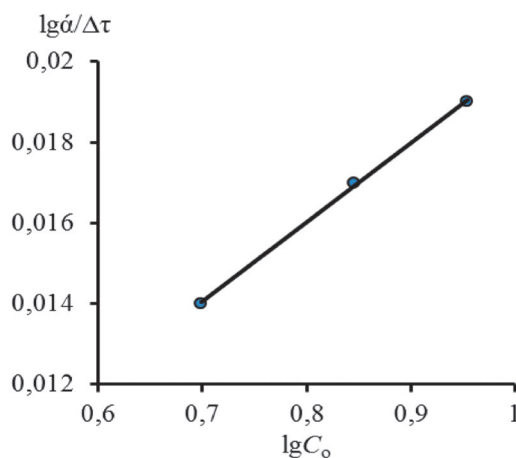
**Fig. 1.** Kinetic curves of zinc leaching with caustic soda. NaOH, mol/dm<sup>3</sup>: 5 (1); 7 (2); 9 (3). V = 20 rad·s<sup>-1</sup>; T = 363 K

Изучение скорости перехода цинка в раствор ω<sub>c</sub>, ω<sub>v</sub>, ω<sub>T</sub> от соответствующего параметра проводили при постоянных величинах двух других параметров, превышающих ранее выявленные минимальные значения (NaOH ≥ 2 моль/дм<sup>3</sup>, V ≥ 10 рад·с<sup>-1</sup>, T ≥ 298 К).

Показатели процесса переработки спека гидроксидом натрия различной концентрации представлены в табл. 3 и на рис. 1, 2.

Показатели процесса щелочной переработки спека при различной скорости перемешивания пульпы представлены в табл. 4 и на рис. 3, 4.

Показатели процесса выщелачивания цинка из спека при различной температуре пульпы представлены в табл. 5 и на рис. 5, 6. На рис. 1–6 и в табл. 3–5 приведены результаты выщелачивания цинка, когда скорость перехода цинка в



**Рис. 2.** Зависимость скорости выщелачивания цинка (lg α/Δτ) от концентрации щелочи (Co). V = 20 рад·с<sup>-1</sup>; T = 363 К

**Fig. 2.** Zinc leaching rate (lg α/Δτ) vs alkali concentration (Co). V = 20 rad·s<sup>-1</sup>; T = 363 K

раствор определяется внешнедиффузионным режимом. Кривые выщелачивания (рис. 1, 3, 5) свидетельствуют о том, что общая скорость процесса возрастает в пределах  $(1,0-1,45) \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ , но в неодинаковой степени, когда повышаются концентрация растворителя, скорость перемешивания и температура пульпы. При увеличении продолжительности выщелачивания установлено снижение скорости перехода цинка в раствор цинка, что, вероятно, объясняется возникновением заметного диффузионного сопро-

тивления при преодолении исходными реагентами и продуктами реакции поверхностного слоя на границе раздела фаз «жидкость-твердое» в исследуемой системе<sup>5</sup>. В частности, при повышении концентрации щелочи с 5 до 9 моль/дм<sup>3</sup>, скорости перемешивания пульпы с 10 до 20 рад·с<sup>-1</sup>, температуры системы с 333 до 363 К значения скорости выщелачивания цинка возрастают на 20–40%:  $\omega_c = (1,125-1,45) \cdot 10^{-3}$ ,  $\omega_v = (0,967-1,45) \cdot 10^{-3}$ ,  $\omega_T = (1,0-1,45) \cdot 10^{-3}$  и практически одинаково влияют на скорость процесса.

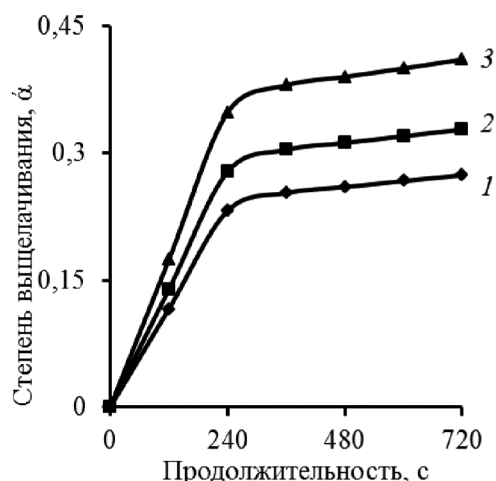


Рис. 3. Кинетические кривые выщелачивания цинка из спека при различной скорости перемешивания пульпы.  $V$ , рад·с<sup>-1</sup>: 10 (1); 15 (2); 20 (3). 9 моль/дм<sup>3</sup> NaOH;  $T = 363 \text{ K}$

Fig. 3. Kinetic curves of zinc leaching from cake at different pulp mixing rates.  $V$ , рад·с<sup>-1</sup>: 10 (1); 15 (2); 20 (3). 9 mol/dm<sup>3</sup> NaOH;  $T = 363 \text{ K}$

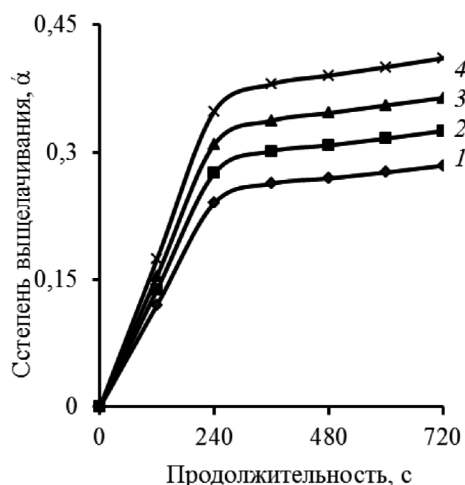


Рис. 5. Кинетические кривые выщелачивания цинка из спека при различной температуре пульпы, К: 333 (1); 343 (2); 353 (3); 363 (4). 9 моль/дм<sup>3</sup> NaOH;  $V = 20 \text{ рад} \cdot \text{с}^{-1}$

Fig. 5. Kinetic curves of zinc leaching from cake at different pulp temperatures, К: 333 (1); 343 (2); 353 (3); 363 (4). 9 mol/dm<sup>3</sup> NaOH;  $V = 20 \text{ рад} \cdot \text{с}^{-1}$

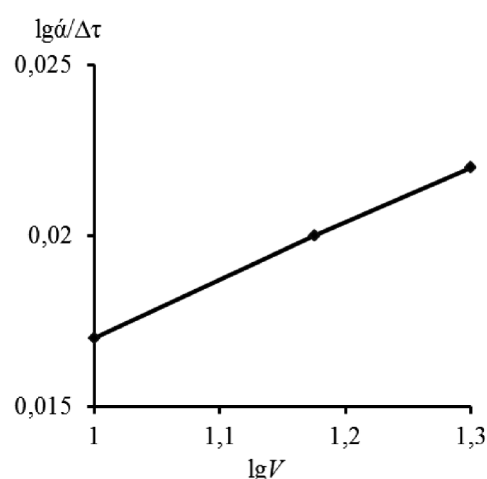


Рис. 4. Зависимость скорости выщелачивания цинка ( $\lg \alpha / \Delta \tau$ ) от интенсивности перемешивания пульпы ( $\lg V$ ). 9 моль/дм<sup>3</sup> NaOH;  $T = 363 \text{ K}$

Fig. 4. Zinc leaching rate ( $\lg \alpha / \Delta \tau$ ) vs pulp mixing intensity ( $\lg V$ ). 9 mol/dm<sup>3</sup> NaOH;  $T = 363 \text{ K}$

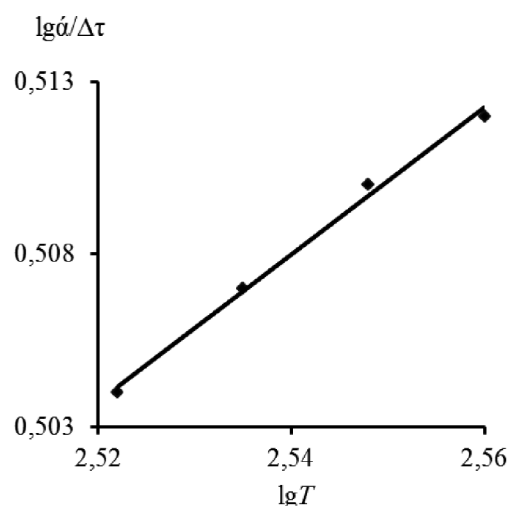


Рис. 6. Зависимость скорости выщелачивания цинка ( $\lg \alpha / \Delta \tau$ ) от температуры пульпы ( $\lg T$ ). 9 моль/дм<sup>3</sup> NaOH;  $V = 20 \text{ рад} \cdot \text{с}^{-1}$

Fig. 6. Zinc leaching rate ( $\lg \alpha / \Delta \tau$ ) vs pulp temperature ( $\lg T$ ). 9 mol/dm<sup>3</sup> NaOH;  $V = 20 \text{ рад} \cdot \text{с}^{-1}$

Согласно данным, представленным на рис. 2, 4, 6, показатели процесса выщелачивания цинка  $n_c = 1,470$ ;  $p_v = 1,218$ ;  $q_T = 0,749$  являются постоянными величинами.

Константа скорости выщелачивания цинка от температуры  $K_T = 1,59 \cdot 10^{-7}$  по абсолютной величине соизмерима с константой скорости  $K_c = 1,48 \cdot 10^{-7}$  и практически в 2 раза выше, чем  $K_v = 0,878 \cdot 10^{-7}$ , полученных в сопоставимых условиях.

Из опытных данных, представленных в табл. 5, в интервале температур 333–363 К определили значение энергии активации  $E = 12,44$  кДж/моль (4,1–4,5 кТ), которая превышает энергию теплового движения молекул ( $E = 1–1,5$  кТ), но типична для внешне-диффузионного режима процесса выщелачивания цинка в исследуемой системе. Графическим способом в координатах «lgD – 1/T» определили  $D_0 = 1,12 \cdot 10^{-8}$  дм<sup>2</sup>/(г-ион)с и  $\lg a = 0,6429 \cdot 10^{-3}$ , К<sup>-1</sup> (рис. 7).

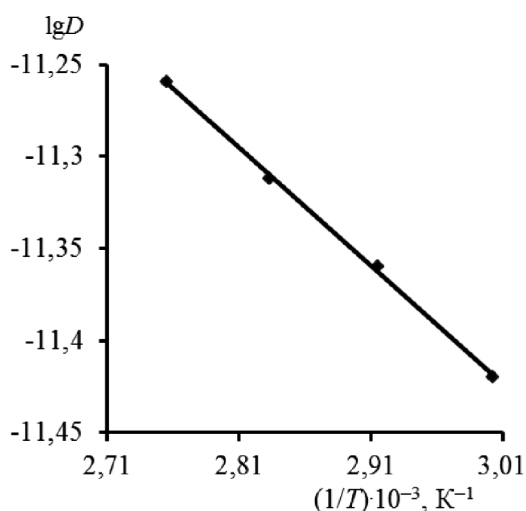


Рис. 7. Зависимость показателя lgD от 1/T при выщелачивании цинка из спека по внешнедиффузионному режиму.  $\lg a = 0,6429 \cdot 10^{-3}$ , К<sup>-1</sup>;  $E = 1,244 \cdot 10^4$  Дж/моль;  $D_0 = 1,12 \cdot 10^{-8}$  дм<sup>2</sup>/(г-ион)с

Fig. 7. lgD indicator vs 1/T under zinc leaching from cake by an external diffusion mechanism.  $\lg a = 0,6429 \cdot 10^{-3}$ , К<sup>-1</sup>;  $E = 1,244 \cdot 10^4$  J/mol;  $D_0 = 1,12 \cdot 10^{-8}$  dm<sup>2</sup>/(g-ion)s

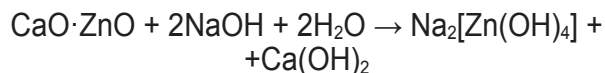
Увеличение значений скорости выщелачивания ( $da/dt$ ) с  $1,0 \cdot 10^{-3}$  до  $1,45 \cdot 10^{-3}$  с<sup>-1</sup> и коэффициента диффузии ( $D$ ) с  $3,8 \cdot 10^{-12}$  до  $5,51 \cdot 10^{-12}$  дм<sup>2</sup>/(г-ион)с, снижение времени 50% извлечения цинка в раствор ( $\tau_{0,5}$ ) с 2416 до 1663 с в интервале температур пульпы 333–363 К при небольшом энергетическом барьере  $E = 12,44$  кДж/моль, вероятно, объясняется следующими факторами: во-первых, при возрастании температуры и дополнительном усилении разупоряд-

очивания структуры поверхностного жидкого слоя на частицах дисперсной фазы, затрудняющего взаимную диффузию растворителя и выщелачиваемого элемента; во-вторых, деструктируется твердый слой образующихся малорастворимых побочных продуктов реакции (гидроксидов металлов-примесей, карбоната кальция), который также затрудняет диффузионные переносы в исследуемой системе. Очевидно, имеются и другие причины увеличения значений  $da/dt$  и  $D$  с ростом температуры системы.

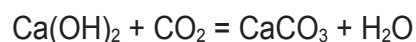
Итак, исследованный режим выщелачивания цинка едким натром из спека известняка с пылями электродуговых печей в данных пределах концентрации щелочи, скорости перемешивания пульпы и температуры относятся преимущественно к внешне-диффузионному переносу исходных реагентов и продуктов реакции через жидкий поверхностный слой на частицах дисперсной фазы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Опыты по выщелачиванию цинка раствором едкого натра из спека пыли электродуговых печей с известняком, полученного для перевода цинка в легкорастворимую форму CaO·ZnO, проводили при перемешивании пульпы в следующих диапазонах исследованных параметров процесса: масса навески спека  $m = 50$  г; исходная концентрация цинка в пульпе  $C_0 = 0,202$  г-ион/дм<sup>3</sup>; концентрация щелочи 5–9 моль/дм<sup>3</sup> NaOH; Ж:Т = 9:1; скорость перемешивания пульпы  $V = 10–20$  рад·с<sup>-1</sup>; температура  $T = 333–363$  К; продолжительность  $\tau = 0,5–2,5$  ч. В результате цинк из спека переходил в раствор в виде тетрагидроксоцинката натрия, а кальций в основном оставался в малорастворимом остатке гидроксида:



Гидроксид кальция вступает во взаимодействие с углекислым газом, при этом образуются нерастворимый карбонат кальция и вода:



Исследованный режим выщелачивания цинка из спека известняка с пылями электродуговых печей в данных пределах концентрации щелочи, скорости перемешивания пульпы и температуры относится преимущественно к внешнедиффузионной области с величиной энергии активации  $E$  равной 12,44 кДж/моль.



## Список источников

1. Растяникова Е.В. Вторичное использование ресурсов в металлургической промышленности в России и Китае // Инновации и инвестиции. 2019. № 7. С. 81–85. EDN: XNRAZG.
2. Казанбаев Л.А., Козлов П.А., Кубасов В.Л., Колесников А.В. Гидрометаллургия цинка. Очистка растворов и электролиз. М.: Руда и Металлы, 2006. 176 с.
3. Cardoso D., Narcy A., Durosoy S., Chevalier Y. The pH dependence of dissolution kinetics of zinc oxide // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2022. Vol. 650. P. 129653. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2022.129653>.
4. Cardoso D., Narcy A., Durosoy S., Bordes C., Chevalier Y. Dissolution kinetics of zinc oxide and its relationship with physicochemical characteristics // Powder Technology. 2021. Vol. 378. Part B. P. 746–759. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.10.049>.
5. Huang Yukun, Duan Zhuo, Bai Ningning, Wang Huijuan, Cao Yijun, Song Xiangyu, Peng Weijun, et al. Highly selective dissolution and synchronous extraction of zinc from zinc-cobalt slag by an ionic liquid [Hbet][Tf<sub>2</sub>N]–H<sub>2</sub>O system: a novel method for separating zinc and cobalt // Journal of Cleaner Production. 2021. Vol. 315. P. 128301. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128301>.
6. Kromm V., Hanreich A., Romeo A. 23. Dissolution kinetics of zinc, copper, and manganese sources in rumen fluid // Animal – science proceedings. 2022. Vol. 13. Iss. 1. P. 14–15. <https://doi.org/10.1016/j.ansci.2022.03.024>.
7. Al-Harashsheh M., Altarawneh S., Al-Omari M. Selective dissolution of zinc and lead from electric arc furnace dust via oxidative thermolysis with polyvinyl chloride and water-leaching process // Hydrometallurgy. 2022. Vol. 212. P. 105898. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2022.105898>.
8. Wu Hangmi, Li Jiangling, Teng Wenxin, Chen Yangfan, Liu Weizao, Ren Shan, et al. One-step extraction of zinc and separation of iron from hazardous electric arc furnace dust via sulphating roasting-water leaching // Journal of Environmental Chemical Engineering. 2023. Vol. 11. Iss. 6. P. 111155. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.111155>.
9. Ye Fu, Li Minting, Su Song, Xia Haitao, Wei Chang, Li Xingbin, et al. Separation and recovery of zinc from blast furnace dust via coordination leaching of Cl<sup>–</sup> and hydrolysis of NH<sub>4</sub><sup>+</sup> // Separation and Purification Technology. 2024. Vol. 330. Part B. P. 125361. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.125361>.
10. Luo Xingguo, Wang Chenyu, Shi Xianguo, Li Xingbin, Wei Chang, Minting Li, et al. Selective separation of zinc and iron/carbon from blast furnace dust via a hydrometallurgical cooperative leaching method // Waste Management. 2022. Vol. 139. P. 116–123. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.12.007>.
11. Yang Xue, Xiaoming Liu, Na Zhang, Song Guo, Zhiqing Xie, Chunbao Xu. A novel process for the treatment of steelmaking converter dust: Selective leaching and recovery of zinc sulfate and synthesis of iron oxides@HTCC photocatalysts by carbonizing carbohydrates // Hydrometallurgy. 2023. Vol. 217. P. 106039. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2023.106039>.
12. Xin Chunfu, Xia Hongying, Jiang Guiyu, Zhang Qi, Zhang Libo, Xu Yingjie, et al. Mechanism and kinetics study on ultrasonic combined with oxygen enhanced leaching of zinc and germanium from germanium-containing slag dust // Separation and Purification Technology. 2022. Vol. 302. P. 122167. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.122167>.
13. Ding Wei, Bao Shenxu, Zhang Yimin, Xiao Junhui. Mechanism and kinetics study on ultrasound assisted leaching of gallium and zinc from corundum flue dust // Minerals Engineering. 2022. Vol. 183. P. 107624. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107624>.
14. Zhang Limin, Wang Yunyan, Ke Yong, Sun Zhumei, Li Yun, Peng Cong, et al. Facile and complete sulfuric acid leaching of zinc ferrite assisted by copper powder: leaching mechanism and kinetics investigation // Separation and Purification Technology. 2024. Vol. 328. P. 125090. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.125090>.
15. Wang Xin, Zhong Yiwei, Kang Yuzheng, Gao Jintao, Guo Zhancheng. Promoted acid leaching of Zn from hazardous zinc-containing metallurgical dusts: focusing on transformation of Zn phases in selective reduction roasting // Process Safety and Environmental Protection. 2022. Vol. 163. P. 353–361. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.05.046>.
16. Xin Chunfu, Xia Hongying, Zhang Qi, Zhang Libo, Zhang Wei. Leaching of zinc and germanium from zinc oxide dust in sulfuric acid-ozone media // Arabian Journal of Chemistry. 2021. Vol. 14. Iss. 12. P. 103450. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2021.103450>.
17. Lijuan Jia, Zhong Yingying, Li Kai, Li Bin, Gao Jiyun, Liu Tiancheng, et al. Recovery of zinc resources from secondary zinc oxide via composite ammonia leaching: analysis of Zn leaching behavior // Chemical Engineering Journal. 2023. Vol. 472. P. 144930. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.144930>.
18. Khodaei H., Haghsheenas D.F., Firoozi S. Selective leaching of zinc from carbonate source using glycine as an ecofriendly lixiviant // Minerals Engineering. 2022. Vol. 185. P. 107680. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107680>.
19. Fan Yangyang, Liu Yan, Niu Liping, Zhang Weiguang, Zhang Zimu. Reductive leaching of indium from zinc-leached residue using galena as reductant // Minerals Engineering. 2021. Vol. 163. P. 106777. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.106777>.
20. Zhang Tianfu, Liu Wei, Han Junwei, Wu Guiting, Jiao Fen, Qin Wenqing. Selective separation of calcium from zinc-rich neutralization sludge by sulfidation roasting and HCl leaching // Separation and Purification Technology. 2021. Vol. 259. P. 118064. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.118064>.
21. Roshanfar M., Khanlarian M., Rashchi F., Moteszarezaei B. Phyto-extraction of zinc, lead, nickel, and cadmium from a zinc leach residue // Journal of Cleaner Production. 2020. Vol. 266. P. 121539. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121539>.

22. Zhou Siyu, Liao Xiaojian, Li Shoupeng, Fang Xiaodi, Guan Zhijie, Ye Maoyou, et al. A designed moderately thermophilic consortia with a better performance for leaching high grade fine lead-zinc sulfide ore // *Journal of Environmental Management*. 2022. Vol. 303. P. 114192. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114192>.
23. Li Changbin, Zhang Guofan, Zheng Hong, Zhang Feng, Liu Kun. Study on glass-ceramic prepared by zinc leaching residue and solidification mechanism of heavy metals // *Journal of Cleaner Production*. 2023. Vol. 426. P. 139021. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.39021>.
24. Касымова А.С., Абишева З.С., Жумартбаев Э.У., Пономарева Е.И. Кинетика выщелачивания галлия серной кислотой из фосфорсодержащего продукта // *Известия вузов. Цветная металлургия*. 1990. № 6. С. 72–75.
25. Чиркст Д.Э., Черемисина О.В., Чистяков А.А., Балян Г.А. Кинетика выщелачивания цинка из шлака свинцово-медного производства // *Известия вузов. Химия и химическая технология*. 2006. Т. 49. № 10. С. 35–38. EDN: HVODQD.

## References

1. Rastiannikova E.V. Resource recycling in metallurgical industry of Russia and China. *Innovatsii i investitsii*. 2019;7: 81–85. (In Russ.). EDN: XNRAZG.
2. Kazanbaev L.A., Kozlov P.A., Kubasov V.L., Kolesnikov A.V. *Hydrometallurgy of zinc. Solution purification and electrolysis*. Moscow: Ruda i Metally; 2006, 176 p. (In Russ.).
3. Cardoso D., Narcy A., Durosoy S., Chevalier Y. The pH dependence of dissolution kinetics of zinc oxide. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2022; 650:129653. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2022.129653>.
4. Cardoso D., Narcy A., Durosoy S., Bordes C., Chevalier Y. Dissolution kinetics of zinc oxide and its relationship with physicochemical characteristics. *Powder Technology*. 2021;378(B):746-759. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.10.049>.
5. Huang Yukun, Duan Zhuo, Bai Ningning, Wang Huijuan, Cao Yijun, Song Xiangyu, Peng Weijun, et al. Highly selective dissolution and synchronous extraction of zinc from zinc-cobalt slag by an ionic liquid [Hbet][Tf<sub>2</sub>N]–H<sub>2</sub>O system: a novel method for separating zinc and cobalt. *Journal of Cleaner Production*. 2021;315:128301. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128301>.
6. Kromm V., Hanreich A., Romeo A. 23. Dissolution kinetics of zinc, copper, and manganese sources in rumen fluid. *Animal – science proceedings*. 2022;13(1):14-15. <https://doi.org/10.1016/j.anscip.2022.03.024>.
7. Al-Harashsheh M., Altarawneh S., Al-Omari M. Selective dissolution of zinc and lead from electric arc furnace dust via oxidative thermolysis with polyvinyl chloride and water-leaching process. *Hydrometallurgy*. 2022;212:105898. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2022.105898>.
8. Wu Hangmi, Li Jiangling, Teng Wenxin, Chen Yangfan, Liu Weizao, Ren Shan, et al. One-step extraction of zinc and separation of iron from hazardous electric arc furnace dust via sulphating roasting-water leaching. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2023;11(6):111155. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.111155>.
9. Ye Fu, Li Minting, Su Song, Xia Haitao, Wei Chang, Li Xingbin, et al. Separation and recovery of zinc from blast furnace dust via coordination leaching of Cl<sup>–</sup> and hydrolysis of NH<sub>4</sub><sup>+</sup>. *Separation and Purification Technology*. 2024;330(B):125361. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.125361>.
10. Luo Xingguo, Wang Chenyu, Shi Xianguo, Li Xingbin, Wei Chang, Minting Li, et al. Selective separation of zinc and iron/carbon from blast furnace dust via a hydrometallurgical cooperative leaching method. *Waste Management*. 2022;139:116-123. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.12.007>.
11. Yang Xue, Xiaoming Liu, Na Zhang, Song Guo, Zhiqing Xie, Chunbao Xu. A novel process for the treatment of steelmaking converter dust: Selective leaching and recovery of zinc sulfate and synthesis of iron oxides@HTCC photocatalysts by carbonizing carbohydrates. *Hydrometallurgy*. 2023;217:106039. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2023.106039>.
12. Xin Chunfu, Xia Hongying, Jiang Guiyu, Zhang Qi, Zhang Libo, Xu Yingjie, et al. Mechanism and kinetics study on ultrasonic combined with oxygen enhanced leaching of zinc and germanium from germanium-containing slag dust. *Separation and Purification Technology*. 2022;302:122167. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.122167>.
13. Ding Wei, Bao Shenxu, Zhang Yimin, Xiao Junhui. Mechanism and kinetics study on ultrasound assisted leaching of gallium and zinc from corundum flue dust. *Minerals Engineering*. 2022;183:107624. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107624>.
14. Zhang Limin, Wang Yunyan, Ke Yong, Sun Zhumei, Li Yun, Peng Cong, et al. Facile and complete sulfuric acid leaching of zinc ferrite assisted by copper powder: leaching mechanism and kinetics investigation. *Separation and Purification Technology*. 2024;328:125090. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.125090>.
15. Wang Xin, Zhong Yiwei, Kang Yuzheng, Gao Jintao, Guo Zhancheng. Promoted acid leaching of Zn from hazardous zinc-containing metallurgical dusts: focusing on transformation of Zn phases in selective reduction roasting. *Process Safety and Environmental Protection*. 2022;163:353-361. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.05.046>.
16. Xin Chunfu, Xia Hongying, Zhang Qi, Zhang Libo, Zhang Wei. Leaching of zinc and germanium from zinc oxide dust in sulfuric acid-ozone media. *Arabian Journal of Chemistry*. 2021;14(12):103450. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2021.103450>.
17. Lijuan Jia, Zhong Yingying, Li Kai, Li Bin, Gao Jiayun, Liu Tiancheng, et al. Recovery of zinc resources from secondary zinc oxide via composite ammonia leaching: analysis of Zn leaching behavior. *Chemical Engineering Journal*. 2023;472:144930. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.144930>.
18. Khodaei H., Haghsheenas D.F., Firoozi S. Selective leaching of zinc from carbonate source using glycine as an ecofriendly lixiviant. *Minerals Engineering*. 2022;185:107680. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107680>.

19. Fan Yangyang, Liu Yan, Niu Liping, Zhang Weiguang, Zhang Zimu. Reductive leaching of indium from zinc-leached residue using galena as reductant. *Minerals Engineering*. 2021;163:106777. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.106777>.
20. Zhang Tianfu, Liu Wei, Han Junwei, Wu Guiting, Jiao Fen, Qin Wenqing. Selective separation of calcium from zinc-rich neutralization sludge by sulfidation roasting and HCl leaching. *Separation and Purification Technology*. 2021;259:118064. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.118064>.
21. Roshanfar M., Khanlarian M., Rashchi F., Motesharezadeh B. Phyto-extraction of zinc, lead, nickel, and cadmium from a zinc leach residue. *Journal of Cleaner Production*. 2020;266:121539. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121539>.
22. Zhou Siyu, Liao Xiaojian, Li Shoupeng, Fang Xiaodi, Guan Zhijie, Ye Maoyou, et al. A designed moderately thermophilic consortia with a better performance for leaching high grade fine lead-zinc sulfide ore. *Journal of Environmental Management*. 2022;303:114192. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114192>.
23. Li Changbin, Zhang Guofan, Zheng Hong, Zhang Feng, Liu Kun. Study on glass-ceramic prepared by zinc leaching residue and solidification mechanism of heavy metals. *Journal of Cleaner Production*. 2023;426:139021. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139021>.
24. Kasymova A.S., Abisheva Z.S., Zhumartbaev E.U., Ponomareva E.I. Kinetics of gallium leaching with sulfuric acid from a phosphorus-containing product. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya = Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 1990;6:72-75. (In Russ.).
25. Chirkst D.E., Cheremisina O.V., Chistyakov A.A., Balyan G.A. Kinetics of lixiviation of Zn from slag of Pb-Cu production. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii khimiya i khimicheskaya tekhnologiya = ChemChemTech*. 2006;49(10):35-38. (In Russ.). EDN: HVODQD.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Якорнов Сергей Александрович,**

к.т.н.,  
первый заместитель технического директора,  
ОАО «Уральская горно-металлургическая  
компания»,  
624091, г. Верхняя Пышма, пр. Успенский, 1, Россия  
✉ [info@uralmine.com](mailto:info@uralmine.com)

**Мальцев Геннадий Иванович,**

д.т.н., старший научный сотрудник,  
главный специалист Исследовательского центра,  
АО «Уралэлектромедь»,  
624091, г. Верхняя Пышма, пр. Успенский, 1, Россия  
[maltsewg@yandex.ru](mailto:maltsewg@yandex.ru)

**Воинков Роман Сергеевич,**

к.т.н.,  
начальник Исследовательского центра,  
АО «Уралэлектромедь»,  
624091, г. Верхняя Пышма, пр. Успенский, 1, Россия;  
доцент кафедры металлургии,  
Технический университет Уральской  
горно-металлургической компании,  
624091, г. Верхняя Пышма, пр. Успенский, 3, Россия  
[r.voinkov@uralcopper.com](mailto:r.voinkov@uralcopper.com)

**Гребнева Анна Александровна,**

к.х.н.,  
ведущий инженер-технолог Исследовательского центра,  
АО «Уралэлектромедь»,  
624091, г. Верхняя Пышма, пр. Успенский, 1, Россия  
[vs\\_finder@mail.ru](mailto:vs_finder@mail.ru)

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Sergey A. Yakornov,**

Cand. Sci. (Eng.),  
First Deputy Technical Director  
Ural Mining & Metallurgical Company,  
1 Uspensky pr., Verkhnyaya Pyshma, 624091, Russia  
✉ [info@uralmine.com](mailto:info@uralmine.com)

**Gennady I. Maltsev,**

Dr. Sci. (Eng.), Senior Researcher,  
Chief Specialist of the Research Center,  
JSC Uralelectromed,  
1 Uspensky pr., Verkhnyaya Pyshma, 624091, Russia  
[maltsewg@yandex.ru](mailto:maltsewg@yandex.ru)

**Roman S. Voinkov,**

Cand. Sci. (Eng.),  
Head of the Research Center,  
JSC Uralelectromed,  
1 Uspensky pr., Verkhnyaya Pyshma, 624091, Russia  
Associate Professor of the Metallurgy Department,  
Technical University of the Ural Mining and Metallurgical  
Company,  
3 Uspensky pr., Verkhnyaya Pyshma, 624091, Russia  
[r.voinkov@uralcopper.com](mailto:r.voinkov@uralcopper.com)

**Anna A. Grebneva,**

Cand. Sci. (Chem.),  
Leading Engineer of the Research Center,  
JSC Uralelectromed,  
1 Uspensky pr., Verkhnyaya Pyshma, 624091, Russia  
[vs\\_finder@mail.ru](mailto:vs_finder@mail.ru)

## Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

## Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

**Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

**Conflict of interests**

The authors declare no conflict of interests.

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

**Информация о статье**

Статья поступила в редакцию 04.12.2023 г.; одобрена после рецензирования 29.12.2023 г.; принята к публикации 15.01.2024 г.

**Information about the article**

The article was submitted 04.12.2023; approved after reviewing 29.12.2023; accepted for publication 15.01.2024.