

Оригинальные статьи

Научная статья

УДК 541.138

<https://doi.org/10.17308/kcmf.2021.23/3434>**Особенности разряда цинка в фоновом растворе сульфата натрия в условиях перемешивания**

А. В. Колесников✉, Е. И. Агеенко

Челябинский государственный университет,
ул. Братьев Кашириных, 129, Челябинск 454001, Российская Федерация**Аннотация**

В технологии гидрометаллургического производства цинка используются различные поверхностно-активные вещества (ПАВ) для сгущения пульп, стабилизации процесса электролиза, получения качественных катодных осадков. Многие исследования по изучению катодных и анодных процессов на широком диапазоне состава водных растворов с использованием различных твердых электродов проведены в отсутствие интенсивного перемешивания электролита и с высоким вкладом миграционной составляющей разряда металлов. Такой подход к исследованию влияния ПАВ часто не позволял увидеть с высокой степенью статистической надежности влияния разно заряженных ПАВ на электродные процессы, что имеет большое значение в гидрометаллургическом производстве цинка. В данной работе была поставлена задача практического исключения вклада миграционной составляющей за счет следующих факторов: проведения электролиза в фоновом растворе сульфата натрия; организации перемешивания электролита; выполнения расчетов плотностей тока в начальный момент протекания электролиза; снятия поляризационных кривых при увеличенной с 20 до 100 мВ/с скорости развертки потенциала. Такой подход позволил в большей степени статистической надежности отразить механизм влияния добавок катионных и анионных ПАВ на стадию разряда цинка на твердом электроде, что являлось целью статьи.

Электролиз проводили в области потенциалов от -1050 до -1250 мВ относительно хлорид серебряного электрода (AgCl/Ag) в присутствии фонового раствора сульфата натрия (0.5 М растворе Na_2SO_4), содержащем 0.005, 0.0125 и 0.025 М ZnSO_4 с введением поверхностно-активных высокомолекулярных веществ: катионных и анионных коагулянтов (флокулянтов) и пенообразователей (лигносульфоната – ЛСТП).

При проведении электролиза в фоновом растворе сульфата натрия при перемешивании установлено, что процесс разряда ионов цинка на твердом электроде реализуется в смешанно-кинетическом режиме. Показано, что положительно заряженные добавки: лигносульфонат, катионный коагулянт (флокулянт) бесфлок K6645 отрицательно влияют на динамику разряда катионов цинка, а отрицательно заряженный бесфлок K4034 практически не влияет. Предложенный в работе подход позволяет оценивать влияние добавок катионных и анионных ПАВ на стадию разряда цинка на твердом электроде, что являлось практической и научной ценностью данной работы.

Ключевые слова: цинк, плотность тока, потенциал, поляризация, коагулянт, лигносульфонат, сульфат натрия, электрод

Для цитирования: Колесников А. В., Агеенко Е. И. Особенности разряда цинка в фоновом растворе сульфата натрия в условиях перемешивания. Конденсированные среды и межфазные границы. 2021;23(2): 229–235. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2021.23/3434>

For citation: Kolesnikov A. V., Ageenko E. I. Features of the discharge of zinc in the background solution of sodium sulfate under stirring conditions. *Kondensirovannyye sredy i mezhfaznye granitsy = Condensed Matter and Interphases*. 2021;23(2): 229–235. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2021.23/3434>

✉ Колесников Александр Васильевич, e-mail: avkzinc@csu.ru

© Колесников А. В., Агеенко Е.И., 2021



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

1. Введение

Как известно на процесс катодного восстановления цинка оказывают влияние различные поверхностно-активные вещества (ПАВ), присутствующие в растворах гидрометаллургического производства [1–9]. К ПАВ относятся пенообразователи, используемые при электролизе цинка, коагулянты (флокулянты), которые добавляют в растворы для повышения скорости отстаивания пульпы и отделения раствора от нерастворимой массы (цинкового кека) в условиях выщелачивания продуктов обжига.

Многие исследования по изучению катодных и анодных процессов в широком диапазоне состава водных растворов с использованием различных электродов [10–17] проведены в отсутствии интенсивного перемешивания электролита и с высоким вкладом миграционной составляющей разряда металлов. Такой подход к исследованию влияния ПАВ часто не позволял увидеть с высокой степенью статистической надежности влияние разно заряженных ПАВ на электродные процессы, что имеет большое значение в гидрометаллургическом производстве цинка. Для того, чтобы исключить возможность миграционного переноса, в исследуемый раствор вводится фоновый электролит в концентрации, превышающей, по крайней мере, на два порядка концентрацию деполяризатора [18, 19, 21]. Исключение миграционного переноса из процесса электролиза позволит увеличить вклад в динамику восстановления катионов стадии переноса заряда через межфазную границу «металл – электролит».

В данной работе была поставлена задача увеличения вклада электрохимической стадии в динамику процесса разряда цинка за счет следующих факторов:

- проведение электролиза в фоновом растворе сульфата натрия;
- организации перемешивания электролита (центробежный критерий Рейнольдса $R_{\text{ц}}$ составлял 1500);
- проведение расчетов плотностей тока в начальный момент протекания электролиза;
- снятие поляризационных кривых при разной скорости развертки потенциала.

Данный подход в работе позволил с высокой степенью статистической надежности оценить влияние добавок катионных и анионных ПАВ на стадию разряда цинка на твердом электроде, что являлось целью и новизной настоящего исследования.

2. Экспериментальная часть

Электрохимические исследования проводили в сульфатном электролите, содержащем 0.005, 0.0125 и 0.025 M ZnSO_4 в фоновом 0.5 M растворе Na_2SO_4 , с введением поверхностно-активных высокомолекулярных веществ: 50 мг/л катионного и анионного коагулянтов (флокулянтов), имеющих товарное название бесфлок K6645 и бесфлок K4034, а также 80 мг/л пенообразователя (лигносульфоната – ЛСТП). Потенциостатические, гальваностатические измерения и снятие поляризационных кривых в динамическом режиме проводили на потенциостате «PotentiostatP-30Jcom» фирмы «Elins» с использованием трехэлектродной ячейки [1]. Рабочий электрод (катод) выполнен из меди площадью 0.1 cm^2 , вспомогательный (анод) – из платиновой пластинки площадью 0.2 cm^2 , электрод сравнения – хлорид серебряный (AgCl/Ag). Рабочий медный электрод шлифовали, обезжиривали этиловым спиртом, промывали водой. Вспомогательный электрод протравливали в растворе азотной кислоты (1 : 2 = кислота : вода) в течение 5 секунд и промывали дистиллированной водой. Измерения проводили при комнатной температуре при перемешивании и без перемешивания. Вначале перед снятием экспериментальных кривых осуществляли наращивание цинка на медном катоде при постоянном потенциале –1200 мВ (AgCl/Ag) в течение 5 мин, используя электролит состава 0.25 M ZnSO_4 . Результаты потенциостатических измерений представлены средними данными, полученными за начальный период 1 с протекания электролиза, а результаты гальваностатических измерений – средними данными за начальный период протекания электролиза 5 с. Поляризационные кривые получали потенциодинамическим методом с линейной разверткой потенциала в области потенциалов –1050 ÷ –1250. При этом максимальную плотность тока фиксировали на поляризационных кривых в интервале потенциалов от –1200 до –1250 мВ.

Для расположенных на рисунках экспериментальных данных рассчитаны доверительные интервалы, которые при уровнях значимости $p = 0.05$ изменялись в пределах от 0.015 до 1.14 mA/cm^2 (для плотностей тока), от 6.82 до 8.77 мВ (для поляризации) и составили 0.111g I, μA при построении логарифмической зависимости величины тока от концентрации цинка в электролите.

3. Результаты и обсуждение

В работе в условиях перемешивания и без перемешивания в фоновом растворе сульфата натрия проведены следующие исследования: при потенциостатических измерениях получены зависимости плотности тока от времени при различных катодных потенциалах: -1100 , -1150 , -1200 , -1250 мВ (AgCl/Ag) (рис. 1а,б) и добавках пенообразователя ЛСТП (рис. 2 а,б). В потенциодинамическом режиме получены зависимости плотности тока от концентрации цинка в

электролите при линейной развертке потенциала 20 и 100 мВ/с (рис. 3) а также от корня квадратного линейной скорости развертки потенциала (рис. 4).

Во время проведения электролиза в присутствии фонового раствора сульфата натрия осажденный на электроде цинк темнеет при катодных потенциалах выше -1150 мВ по абсолютной величине. Связано это с окислением восстановленного цинка и с возможным протеканием побочной реакции восстановления сульфат-ионов

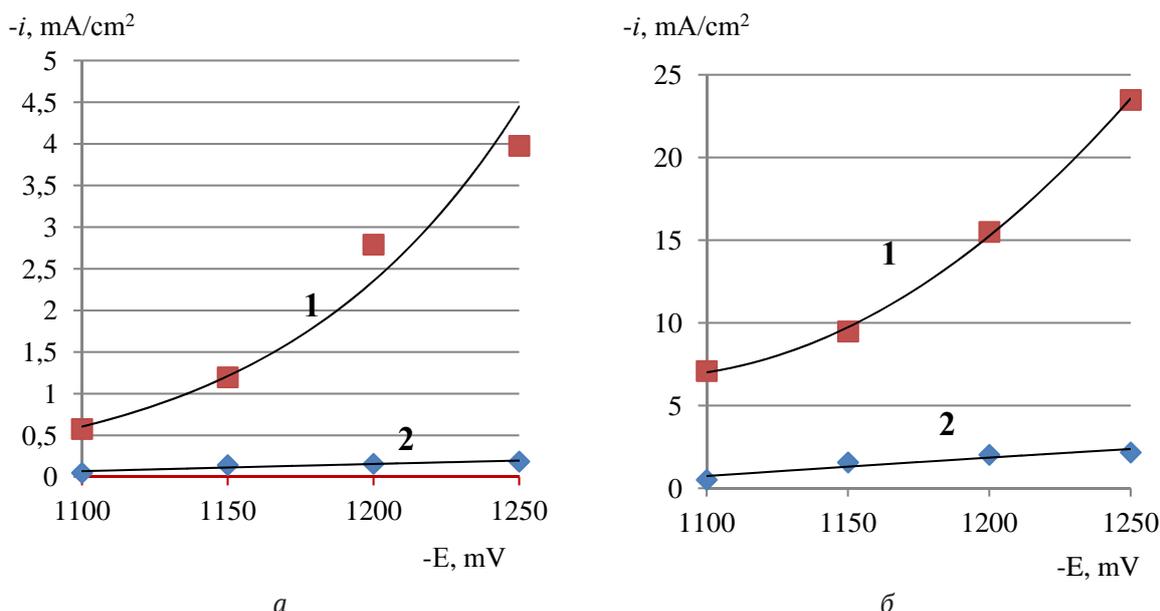


Рис. 1. Зависимость плотности тока (i) от катодного потенциала (E): 1 – при перемешивании; 2 – без перемешивания. Содержание в электролите сульфата натрия 0.5 М и сульфата цинка: а – 0.005 М; б – 0.025 М. Доверительный интервал при уровнях значимости ($p = 0.05$) составил 0.30 мА/см² (а) и 1.14 мА/см² (б)

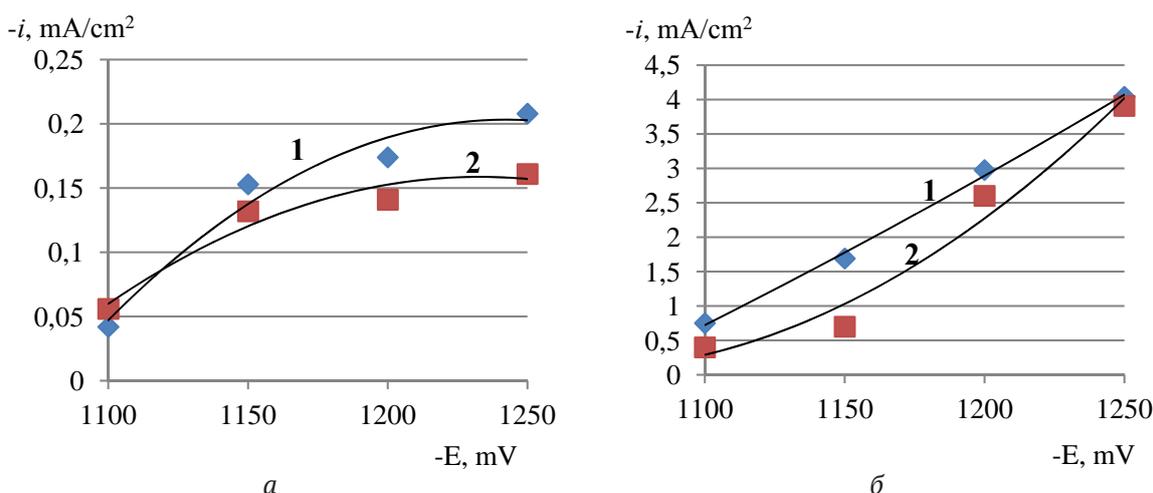


Рис. 2. Зависимость плотности тока (i) от катодного потенциала (E) в условиях без перемешивания (а) и при перемешивании (б). Содержание в электролите сульфата натрия 0.5 М, а сульфата цинка 0.005 М: 1 – без добавки; 2 – с добавкой 50 мг/л ЛСТП. Доверительный интервал ($p = 0.05$) составил 0.015 мА/см² (а) и 0.125 мА/см² (б)

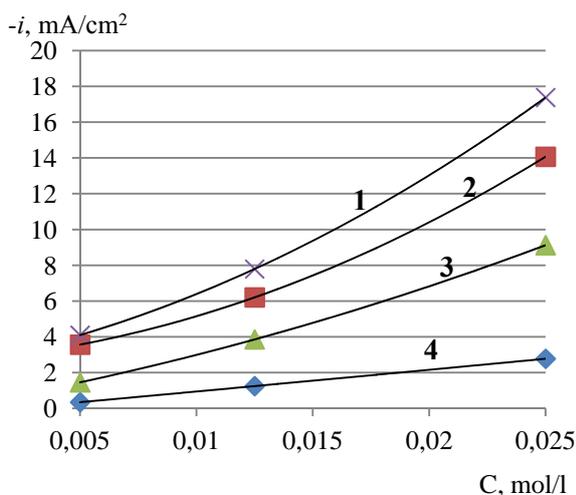


Рис. 3. Зависимость максимальной плотности тока (*i*) от концентрации сульфата цинка (*C*) в фоновом растворе 0.5 М сульфата натрия в условиях линейной развертки потенциала в области потенциалов от –1050 до –1250 мВ со скоростью 100 мВ/с (1 – при перемешивании; 3 – без перемешивания) и со скоростью развертки 20 мВ/с (2 – при перемешивании; 4 – без перемешивания). Доверительный интервал ($p = 0.05$) – 0.85 мА/см²

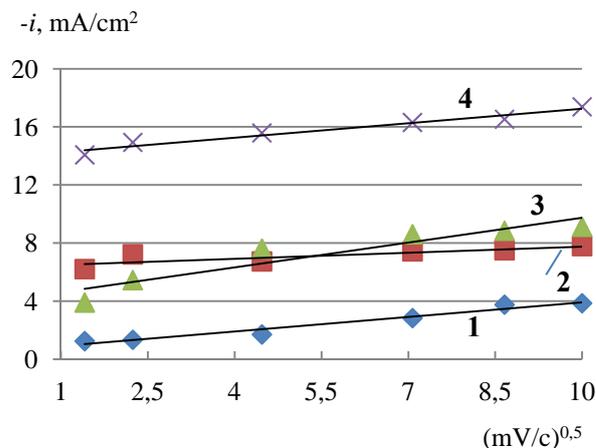


Рис. 4. Зависимость максимальной величины плотности тока (*i*) в фоновом растворе 0.5 М сульфата натрия от корня квадратного линейной скорости развертки потенциала в области потенциалов от –1050 до –1250 мВ. 1 – концентрация цинка (*C*) = 0.0125 М в отсутствии перемешивания, 2 – *C* = 0.0125 М с перемешиванием; 3 – *C* = 0.025 М без перемешивания, 4 – *C* = 0.025 М с перемешиванием. Доверительный интервал ($p = 0.05$) – 0.85 мА/см²

на катоде, как отмечено в работах [20, 22], и обосновано там проведенными термодинамическими расчетами и полученными экспериментальными данными.

Сравнивая поляризационные кривые (рис. 1а,б), видно существенное возрастание плотностей тока (на порядок и более) в условиях перемешивания при всех потенциалах. Без перемешивания поляризационные кривые имеют линейную зависимость, а с перемешиванием зависимость изменения плотности тока от потенциала можно отнести к квадратичной зависимости. Полученные экспериментальные данные позволяют сделать предположение об увеличении вклада электрохимической стадии в общую скорость процесса разряда цинка в условиях перемешивания. Аналогичные данные получены при снятии поляризационных кривых потенциодинамическим методом с линейной разверткой потенциала в области потенциалов –1050 ÷ –1250 мВ (рис. 4). При построении зависимостей величин тока от корня квадратного линейной развертки потенциала можно отметить, что прямые не проходят через начала координат. В работе [23] в этом случае делается заключение о протекании процесса в смешанном режиме.

В условиях без перемешивания при низких катодных потенциалах (–1100, –1150 мВ)

и содержании цинка в растворе 0.005 М влияние добавки ЛСТП практически не проявляется (рис. 2а). В то же время, в условиях интенсивного перемешивания наблюдаем в указанной выше области потенциалов снижение плотности тока при добавке 50 мг/л ЛСТП (рис. 2б). Исходя из полученных данных, следует вывод, что пенообразователь ЛСТП в условиях перемешивания в большей степени влияет непосредственно на стадию переноса заряда через межфазную границу «металлический электрод – электролит». При этом принимаем, что добавка 50 мг/л ЛСТП не должна заметно влиять на транспортную стадию процесса разряда цинка.

Для изучения механизма процесса электролиза цинка в фоновом растворе сульфата натрия в условиях интенсивного перемешивания был рассчитан порядок реакции по иону цинка при четырех потенциалах. В расчетах использовали данные величин тока разряда, определенные потенциостатическим методом [24] за первую секунду начала процесса. Расчеты проведены по ниже приведенному уравнению логарифмической зависимости величин тока разряда от концентрации цинка в растворе:

$$I = K \cdot (C_{Zn^{2+}})^z,$$

$$\lg I = \lg K + z \lg C_{Zn^{2+}},$$

где I – ток разряда, мкА, z – порядок реакции по иону цинка, K – константа. Результаты приведены на рис. 5 и 6.

По данным рис. 5 и 6 видно, что все зависимости с высокими коэффициентами корреляции ($R^2 = 0.98–0.99$ и выше) описываются прямыми линиями. С добавкой пенообразователя порядок реакции по цинку для исследуемой системы в среднем возрастает при 4-х потенциалах с 1.224 ± 0.059 (без добавки) до 1.475 ± 0.126 . Считаем, что увеличение порядка реакции выше единицы по кон-

центрации цинка в электролите в системе с перемешиванием связано с переходом процесса из диффузионного в смешанный режим.

Как показали данные, снятые в гальваностатическом режиме, в условиях интенсивного перемешивания поляризация электрода в присутствии и в отсутствии добавок снижается. Так, при добавке катионного коагулянта поляризация при плотности тока 1.7 мА/см^2 (рис. 7 а,б) уменьшается в 1.6 раза, а в присутствии анионного и без добавки коагулянта – почти в 3 раза.

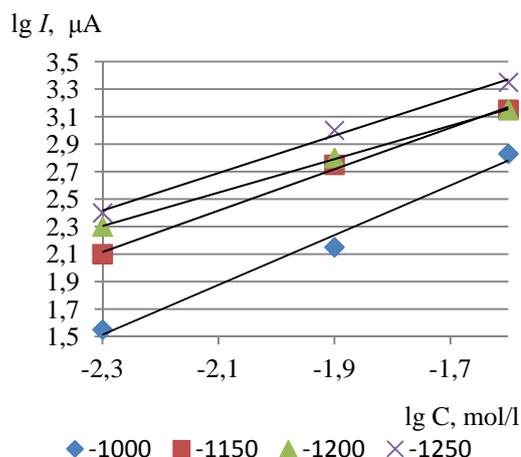
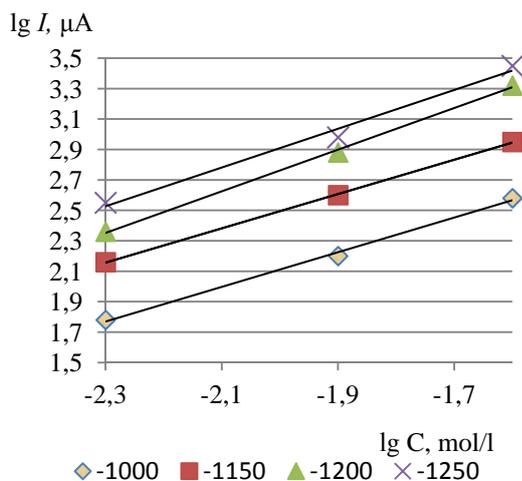


Рис. 5. Логарифмическая зависимость начальной величины тока ($\lg I$) (за 1 с) от концентрации цинка ($\lg C$) в электролите с фоном Na_2SO_4 (0.5 моль/л) при разных потенциалах (-1100; -1150; -1200; -1250) мВ по Ag/AgCl). Раствор без пенообразователя. В условиях перемешивания. Доверительный интервал ($p = 0.05$) – 0.11 ($\lg I, \mu\text{A}$)

Рис. 6. Логарифмическая зависимость начальной величины тока ($\lg I$) (за 1 с) от концентрации цинка ($\lg C$) в электролите с фоном Na_2SO_4 (0.5 моль/л) при разных потенциалах (-1100; -1150; -1200; -1250) мВ по Ag/AgCl). Раствор с добавкой 80 мг/л пенообразователя. В условиях перемешивания. Доверительный интервал ($p = 0.05$) – 0.11 ($\lg I, \mu\text{A}$)

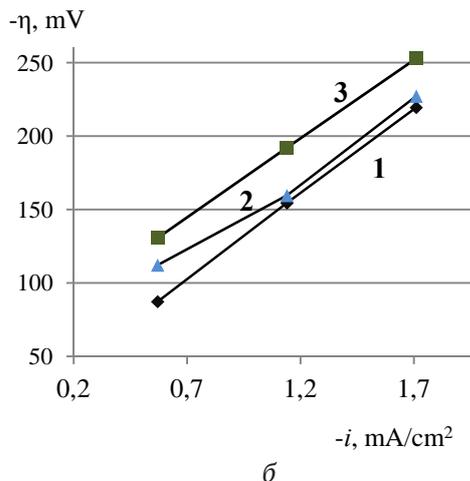
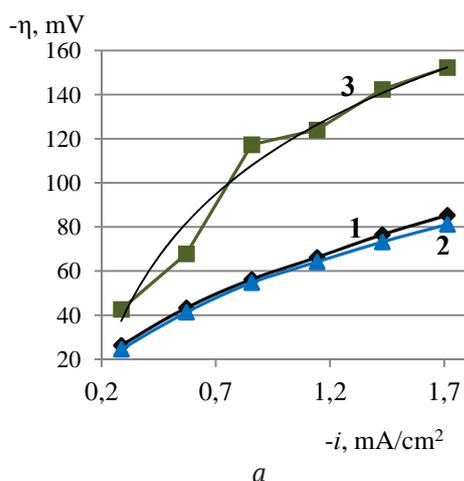


Рис. 7. Зависимость поляризации ($-\eta$) от плотности тока ($-i$) при проведении электролиза раствора $0.025 \text{ M ZnSO}_4 + 0.5 \text{ M Na}_2\text{SO}_4$. 1 – без коагулянта; 2 – анионный; 3 – катионный. С перемешиванием, доверительный интервал ($p = 0.05$) – 8.77 mV (а). Без перемешивания, доверительный интервал ($p = 0.05$) – 6.82 mV (б)

Полученные данные свидетельствовали об изменении механизма протекания электролиза цинка в условиях перемешивания, когда значительно ускоряется процесс массопереноса и начинает возрастать вклад в динамику процесса стадии переноса заряда через межфазную границу «электрод – электролит», так называемой электрохимической стадии. Об этом свидетельствуют экспериментальные данные влияния анионных и катионных ПАВ на процесс разряда цинка. Если бы процесс разряда цинка лимитировала бы только транспортная стадия (концентрационная поляризация), то неодинаковое влияние разно заряженных коагулянтов на катодный процесс, по-нашему мнению, маловероятно.

Таким образом, полученные экспериментальные данные в условиях интенсивного перемешивания в присутствии фоновых растворов сульфата натрия, пенообразователя, анионных и катионных коагулянтов (флокулянтов) согласуются с теоретическими представлениями электрохимических процессов [25–26].

4. Выводы

Полученные в работе данные, в частности: квадратичная зависимость плотности тока разряда цинка от величины катодного потенциала; отсутствие прохождения через начала координат прямых зависимости плотности тока разряда цинка от величины корня квадратного скорости развертки потенциала; изменение в присутствии ПАВ порядка реакции электролиза цинка; повышение интервала влияния разно заряженных ПАВ на электродные процессы позволяют установить, что процесс разряда ионов цинка в фоновом растворе на твердом электроде реализуется в смешанно-кинетическом режиме, где выделить преимущественный вклад в динамику процесса стадии массопереноса ионов или стадии перехода заряда через межфазную границу «электрод – электролит» затруднительно.

Таким образом, предложенный в работе подход позволил с высокой степенью статистической надежности оценивать влияние добавок катионных и анионных ПАВ на стадию разряда цинка, что имеет большое значение в гидрометаллургической технологии и определяет основные направления для исследования в данной области.

Заявленный вклад авторов

Колесников А. В. – научное руководство, постановка задачи, концепция исследования, методология, итоговые выводы. Агеенко Е. И. –

проведение экспериментальной работы, участие в анализе полученных данных, редактирование текста.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет известных финансовых конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в этой статье.

Список литературы

1. Колесников А. В., Козлов П. А. Влияние пиридина на показатели электролиза цинка при различных плотностях тока. *Цветные металлы*. 2018;(8): 45–49. <https://doi.org/10.17580/tsm.2018.08.05>
2. Ivanov I., Stefanov Y. Electroextraction of zinc from sulphate electrolytes containing antimony ions and hydroxyethylated-butylene-2-diol-1,4: Part 3. The influence of manganese ions and a divided cell. *Hydrometallurgy*. 2002;64(3): 181–186. [https://doi.org/10.1016/S0304-386X\(02\)00039-7](https://doi.org/10.1016/S0304-386X(02)00039-7)
3. Stefanov Y., Ivanov I. The influence of nickel ions and triethylbenzylammonium chloride on the electrowinning of zinc from sulphate electrolytes containing manganese ions. *Hydrometallurgy*. 2002;64(3): 193–203. [https://doi.org/10.1016/S0304-386X\(02\)00037-3](https://doi.org/10.1016/S0304-386X(02)00037-3)
4. Колесников А. В. Исследования влияния ди-2-этил-гексил фосфорной кислоты на параметры электролиза цинка из кислых растворов. *Бутлеровские сообщения*. 2018;55(8): 127–133. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35659982>
5. Колесников А. В., Козлов П. А., Фоминых И. М. Исследования влияния добавки уайт-спирита на параметры электролиза цинка из кислых растворов. *Бутлеровские сообщения*. 2018;55(8): 120–126. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35659981>
6. Karavasteva M. The effect of some surfactants on the dissolution of zinc in sulfuric acid solutions containing ions of metallic impurities. *Canadian Metallurgical Quarterly*. 2004;43(4): 461–468. <https://doi.org/10.1179/cmq.2004.43.4.461>
7. Колесников А. В. Электровосстановление цинка из фонового раствора сульфата натрия в присутствии катионных и анионных флокулянтов. *Бутлеровские сообщения*. 2017;49(2): 130–136. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29197189>
8. Ivanov I. Increasing the current efficiency during zinc electroextraction in the presence of metal impurities by adding organic inhibitors. *Hydrometallurgy*. 2004;72(1-2): 73–78. [https://doi.org/10.1016/S0304-386X\(03\)00129-4](https://doi.org/10.1016/S0304-386X(03)00129-4)

9. Tripathy B. C., Das S. C., Misra V. N. Effect of antimony(III) on the electrocrystallisation of zinc from sulphate solutions containing SLS. *Hydrometallurgy*. 2003;69(1-3): 81–88. [https://doi.org/10.1016/S0304-386X\(02\)00204-9](https://doi.org/10.1016/S0304-386X(02)00204-9)
10. Колесников А. В. Восстановление меди металлическим цинком в водных растворах в присутствии высокомолекулярных ПАВ. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2016;18(1): 46–55. Режим доступа: <https://journals.vsu.ru/kcmf/article/view/107/128>
11. Krstajic N. V., Grgur B. N., Mladenovic N. S., Vojnovic M. V., Jaksic M. M. Determination of the kinetic parameters of hydrogen evolution. *Electrochimica Acta*. 1997;42(2): 323–330. [https://doi.org/10.1016/0013-4686\(96\)00188-0](https://doi.org/10.1016/0013-4686(96)00188-0)
12. Целуйкин В. Н., Корешкова А. А., Неверная О. Г., Целуйкина Г. В., Соловьева Н. Д. Электроосаждение и свойства цинковых композиционных покрытий, модифицированные углеродными нанотрубками. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2013;15(4): 466–469. Режим доступа: <https://journals.vsu.ru/kcmf/article/view/936/1018>
13. Сапронова Л. В., Соцкая Н. В., Долгих О. В. Кинетика электроосаждения никеля из комплексных электролитов, содержащих аминокислоты. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2013;15(4): 446–452. Режим доступа: <https://journals.vsu.ru/kcmf/article/view/933/1015>
14. Колесников А. В., Казанбаев Л. А., Козлов П. А. Влияние органических веществ на процессы цементации и электролиза цинка. *Цветные металлы*. 2006(8): 24–28. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=9245180>
15. Кичигин В. И., Шейн А. Б. Влияние анодирования на кинетику выделения водорода на силицидах кобальта в растворе серной кислоты. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2017;19(3): 359–367. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2017.19/212>
16. Скибина Л. М., Дуран Дельгадо О. А., Соколенко А. И. Кинетика электроосаждения и морфология поверхности кадмиевых и кадмийорганических покрытий, содержащих е-капролактан. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2017;19(3): 430–440. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2017.19/220>
17. Кондрашин В. Ю., Шафрова М. Ф. Растворение меди в персульфатных средах при катодных потенциалах. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2017;19(4): 517–22. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2017.19/230>
18. Галюс З. *Теоретические основы электрохимического анализа*. М.: Мир; 1974. 552 с.
19. Alfantazi A. M. An investigation on the effects of orthophenylene diamine and sodium lignin sulfonate on zinc electrowinning from industrial electrolyte. *Hydrometallurgy*. 2003;69(1-3): 99–107. [https://doi.org/10.1016/S0304-386X\(03\)00030-6](https://doi.org/10.1016/S0304-386X(03)00030-6)
20. Колесников А. В., Фоминых И. М. Параметры электролиза сульфатных растворов цинка. *Бутлеровские сообщения*. 2017;51(8): 89–97. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30506038>
21. Solmaz R., Kardas G., Yazici B., Erbil M. Adsorption and anticorrosive properties of 2-amino-5-mercapto-1,3,4-thiadiazole on mild steel in hydrochloric acid media *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2008;(312): 7–17. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2007.06.035>
22. Колесников А. В. Катодные и анодные процессы в растворах сульфата цинка в присутствии поверхностно-активных веществ. *Известия ВУЗов «Химия и химическая технология»*. 2016;59(1): 53–57. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25501669>
23. Минин И. В., Соловьева Н. Д. Кинетика электровосстановления цинка из сульфатного электролита в присутствии добавок ПАВ. *Вестник СГТУ. Химия и Химические технологии*. 2013;69(1): 57–62. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19415711>
24. Ротинян А. Л., Тихонов К. И., Шошина И. А. *Теоретическая электрохимия*. Л.: Химия; 1981. 422 с.
25. Эткинс П. *Физическая химия*: Т.2. М.: Мир; 1980. 584 с.
26. Скорчеллетти В. В. *Теоретическая электрохимия*. Изд. 4-е, испр. и доп. Л.: Химия; 1974. 567 с.

Информация об авторах

Колесников Александр Васильевич, д. т. н., с. н. с., заведующий кафедрой аналитической и физической химии химического факультета, Челябинский государственный университет, Челябинск, Российская Федерация; e-mail: avkzinc@csu.ru. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-9747-1241>.

Агеенко Егор Игоревич, ассистент, кафедра аналитической и физической химии химического факультета, Челябинский государственный университет, Челябинск, Российская Федерация; e-mail: ag-40@mail.ru. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-2701-9831>.

Поступила в редакцию 28.01.2021; одобрена после рецензирования 17.03.2021; принята к публикации 15.05.2021; опубликована онлайн 25.06.2021.