

УДК 519.6

DOI: 10.46548/21vek-2022-1159-0011

**МЕТОДИКА РАСЧЕТА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОАКТИВНЫХ КОМПОНЕНТОВ ПРИ
ЭЛЕКТРОВОССТАНОВЛЕНИИ ИОНОВ ЖЕЛЕЗА НА ПРОТОЧНОМ ТРЕХМЕРНОМ ЭЛЕКТРОДЕ**

© Автор(ы) 2022

SPIN-код: 9075-4096

AuthorID: 642415

ORCID: 0000-0003-4511-7176

ResearcherID: GOP-3388-2022

ScopusID: 57190165261

КУЗИНА Валентина Владимировна, кандидат технических наук,
доцент кафедры «Информационно-вычислительные системы»

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства
(440028, г. Пенза, ул. Германа Титова, 28, e-mail: kuzina@pguas.ru)*

SPIN-код: 4008-3010,

AuthorID: 43826

ORCID: 0000-0001-8622-9364

ResearcherID: A-0000-0000

ScopusID: 7004176778

ВАРЕНЦОВ Валерий Константинович, доктор технических наук, профессор,
ведущий научный сотрудник лаборатории электрохимии гетерогенных систем

*Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН
(630128, Россия, г. Новосибирск, ул. Кутателадзе, 18, e-mail: vvk@ngs.ru)*

SPIN-код: 1569-1966

AuthorID: 47930

ORCID: 0000-0003-3057-4980

ResearcherID: AAD-1496-2021

ScopusID: 8900920000

КОШЕВ Александр Николаевич, доктор химических наук,
профессор кафедры «Информационно-вычислительные системы»

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства
(440028, Россия, г. Пенза, ул. Германа Титова, 28, e-mail: koshev@pguas.ru)*

Аннотация. Приводится исследование процесса электровосстановления ионов железа на проточном трехмерном электроде (ПТЭ) с использованием математического моделирования. Цель исследования – изучить основные закономерности распределения электроактивных компонентов по толщине объемно-пористого проточного электрода, а также исследовать влияние поляризации и локальной плотности тока на эффективность процесса. Приведенные методики расчета распределения электроактивных компонентов позволили изучить влияние габаритной плотности тока на восстановление ионов трехвалентного железа $Fe(III)$. В результате выполненного исследования, приведенного в настоящей работе, показано, что плотность тока является одним из основных технологических параметров, позволяющих обеспечить высокую производительность электрохимического процесса на проточных трехмерных электродах, в том числе из углеродных волокнистых материалов.

Ключевые слова: трехмерный проточный электрод, математическое моделирование, численные расчеты, поляризация, локальная плотность тока, углеграфитовые волокнистые материалы

**THE CALCULATION METHODOLOGY OF ELECTRICALLY ACTIVE COMPONENTS
DISTRIBUTION DURING THE ELECTRICAL REDUCTION OF IRON IONS
ON A FLOWING THREE-DIMENSIONAL ELECTRODE**

© The Author(s) 2022

KUZINA Valentina Vladimirovna, candidate of Technical Sciences,
associate professor of the department «Information and computing systems»

*Penza State University of Architecture and Construction
(440028, Russia, Penza, German Titov St., 28, e-mail: kuzina@pguas.ru)*

VARENTSOV Valery Konstantinovich, doctor of technical Sciences, professor,
leading researcher Laboratory of Electrochemistry of Heterogeneous Systems

*Institute of Solid State Chemistry and Mechanochemistry of Siberian branch of Russian Academy of Science
(630128, Russia, Novosibirsk, st. Kutateladze, 18, e-mail: vvk@ngs.ru)*

KOSHEV Alexander Nikolaevich, doctor of Chemistry Science,
professor of the department «Information and computing systems»

Penza State University of Architecture and Construction
(440028, Russia, Penza, German Titov St., 28, e-mail: koshev@pguas.ru)

Abstract. The following article represents the results of the research of the process of electro reduction of iron ions on a flowing three-dimensional electrode (FTE) with the application of mathematical modeling. The purpose of the research is to study the main peculiarities of electroactive components distribution over the thickness of a volume-porous flow electrode, as well as to investigate the effect of polarization and local current density on the efficiency of the process. The mentioned methods of the distribution calculating of electroactive components made it possible to analyze the effect of the overall current density on the reduction of ferric iron ions $Fe(III)$. As a result of this presented research, it is shown that the current density is one of the main technological parameter that make it possible to ensure the high performance of the electrochemical process on flowing three-dimensional electrodes, including those made of carbon fiber materials.

Keywords: flowing three-dimensional electrode, mathematical modeling, numerical calculations, polarization, local current density, carbon-graphite fibrous materials.

Для цитирования: Кузина В.В. Методика расчета распределения электроактивных компонентов при электровосстановлении ионов железа на проточном трехмерном электроде / В.В. Кузина, В.К. Варенцов, А.Н. Кошев // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2022. – Т. 11. – № 3(59). – С. 69-73. – DOI: 10.46548/21vek-2022-1159-0011.

Введение. Эффективным методом решения задачи научного исследования закономерностей процессов электрохимического извлечения металлов на проточные трехмерные электроды (ПТЭ) из углеграфитовых волокнистых материалов (УВМ) является метод математического моделирования, позволяющий путем численных экспериментов изучать как возможные электрохимические реакции, так и их результаты в объеме объемно-пористых электродов [1-17]. Использование методов математического моделирования и вычислительных методов позволяет определить влияние основных технологических параметров на эффективность электрохимических процессов и, в ряде случаев, оптимизировать рабочие условия электролиза, такие как скорость потока, плотность тока, концентрация реагентов и температура [8-11]. Таким образом, расчет распределения электроактивных компонентов и исследование электрохимических процессов, протекающих в системах с ПТЭ, с использованием математического моделирования, является актуальной задачей.

Математическая модель электролиза в ПТЭ основана на теоретическом описании процессов электроосаждения и представляет собой систему дифференциальных, интегральных и алгебраических уравнений, описывающих распределение основных электрохимических функций: концентрации электроактивных веществ, поляризации и парциальных токов в порах пористого трехмерного электрода. При этом электрохимические параметры, используемые при описании процессов в ПТЭ, определены как из литературных источников (такие, как равновесные потенциалы электродных реакции электроактивных компонентов, числа массопереноса, коэффициенты конвективной диффузии, валентности разряжающихся ионов и др.), так и получены экспериментальными методами (такие, как электропроводные характеристики системы с ПТЭ, удельная реакционная поверхность, начальная пористость УВМ и др.).

Аналитическое решение системы дифференциальных уравнений не всегда возможно получить, обычно оно ограничивается лишь рассмотрением некоторых частных случаев. Поэтому авторами применялись компьютерные эксперименты, основанные на численных методах решения моделирующих уравнений, описывающих процессы и закономерности электрохимической регенерации электролитов железнения металлических поверхностей.

Методология. Цель исследования – изучение на основе математического моделирования основных закономерностей распределения электроактивных компонентов по толщине объемно-пористого проточного электрода, а также исследовать влияние поляризации и локальной плотности тока на эффективность процесса.

При протекании процессов на УВЭ преимущественный перенос массы и заряда проходит путем принудительной конвекции, когда диффузия и естественная конвекция пренебрежительно малы. Тогда согласно приведенному в работе [13] математическому описанию, процесс восстановления n компонентов в объеме пористого электрода описывается следующим уравнением:

$$j_i(x) = \frac{j_{i0}(e^{M_{i1}} - e^{M_{i2}})}{1 + j_{i0}e^{M_{i1}}/z_i F C_i(x) v(x)}. \quad (1)$$

где j_{i0} – плотность тока обмена; j_i – плотность поляризующего тока; $e^{M_{i1}}$ и $e^{M_{i2}}$ – потенциалы; z_i – заряд i -го электроактивного компонента ($i = 1, \dots, 4$); F – число Фарадея, Кл·моль⁻¹; D – коэффициент диффузии, см²/с; $C_i(x)$ – концентрация i -го электроактивного компонента ($i = 1, \dots, 4$); $v(x)$ – линейная скорость протока электролита, распределенная по толщине ПТЭ в силу возможного неравномерного зарастания материала электрода металлом.

Вводя в рассмотрение величину $j_{ip}(x) = z_i F D C_i(x) / r_w$, которая в первом приближении отражает значение предельного диффузионного тока, уравнение (1) можно представить в следующем виде:

$$j_i(x) = \frac{P e_{i0}(e^{M_{i1}} - e^{M_{i2}})}{P e_{i0} + j_{i0} e^{M_{i1}} / j_{ip}(x)}. \quad (2)$$

Для исследования выбрана электрохимическая система со следующими электродными реакциями: $Fe(III) + e \rightleftharpoons Fe(II)$; $Fe(II) + 2e \rightleftharpoons Fe^0$; $2H^+ \rightarrow H_2$. Использовался электролит железнения следующего состава: концентрация ионов двухвалентного железа $Fe(II)$ – 2,5 моль/л, концентрация ионов трехвалентного железа $Fe(III)$ – от $1,8 \cdot 10^{-3}$ до $1,8 \cdot 10^{-1}$ моль/л, электропроводность раствора $\chi_G = 0,14$ См/см. Использованные катоды выполнены из УВМ марок ВИНН-250, НТМ-100, НТМ-200, ВВП-66-95, КНМ, ВНГ-50, ТГН и ТВШ. Параметры катодов: удельная реакционная поверхность электрода (S_v , см²/см³), электропроводность электрода (χ , См/см²) и пористость материала электрода (ϵ) взяты из литературных источников [14, 15]. При проведении исследований учитывалось изменение параметров электродных материалов при сжатии образцов в 2 раза, кроме того плотность тока (j , А/см²) и линейная скорость протока (u , см/с), варьировались в заданных пределах.

Значения коэффициента диффузии $D^{Fe(II)}$ и тока обмена j_0 ионов $Fe(II)$ реакции $Fe(III) + e \rightleftharpoons Fe(II)$, приведены в работах [18,19]: $0,535 \cdot 10^{-5}$ см²/с и $0,019$ А/см². Стационарный потенциал рассматриваемой реакции, согласно этим же исследованиям, составляет $E^{Fe(III)} = +0,643$ В. Используемое при расчетах значение

коэффициента переноса ионов $Fe(III)$ выбрано равным $0,59$ [20].

Последующая реакция $Fe(II) + 2e \rightleftharpoons Fe^0$ характеризуется следующими параметрами: $D^{Fe(II)} = 0,6 \cdot 10^{-5}$ см²/с; $\alpha^{Fe(II)} = 0,43$ [20]; $z^{Fe(II)} = 2$. Стационарный потенциал, согласно исследованиям авторов – $E^{Fe(II)} = -0,62$ [18].

Ток обмена ионов $Fe(II)$ ($j_0^{Fe(II)}$) определялся с учетом достаточно больших значений удельной поверхности и микрошероховатости волокон УВЭ. Для коррекции значений тока обмена был выбран коэффициент, равный 100. С учетом сделанных замечаний, величина тока обмена, используемого в расчетах, составила $1 \cdot 10^{-6}$ А/см² [21].

Для реакции выделения водорода выбраны следующие кинетические параметры: $E = -0,83$ В [14], $\alpha = 0,49$ [18], ток обмена – $2 \cdot 10^{-6}$ [21].

Кроме перечисленных, в рассматриваемой электродной системе возможна электродная реакция с участием молекулярного кислорода: $E_p^{O_2} = 1,1$ В; $j_p^{O_2} = 10^{-8}$ А/см²; $z^{O_2} = 2$.

Результаты. Экспериментальные значения основных кинетических параметров протекающих процессов при регенерации электролитов железнения на ПТЭ, которые составили основу для проведения численных компьютерных расчетов, приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Экспериментальные значения кинетических параметров электрохимических процессов при регенерации электролита железнения на ПТЭ

Комп/конст	Концентр. (г/см ³)	Стационарный потенц. (Е, В)	Ток обмена (j_0 , А/см ²)	Коэфф. переноса (α_m) (k_m , см/с)	Коэффициент диффузии (D, см/с)
$Fe^{(III)} \rightarrow Fe^{(II)}$	$1,8 \cdot 10^{-3}$	0,643	0,019	0,59	$0,535 \cdot 10^{-5}$
$Fe^{(II)} \rightarrow Fe^{(0)}$	$1,4 \cdot 10^{-1}$	0,620	$1 \cdot 10^{-6}$	0,43	$0,6 \cdot 10^{-5}$
Кислород	$2 \cdot 10^{-5}$	0,4 – 0,5	$1 \cdot 10^{-10}$	0,5	$3 \cdot 10^{-6}$
Водород	–	–0,83	$2 \cdot 10^{-6}$	0,49	–

Результаты были получены в численном виде, на основании которых строились графики зависимостей, отражающих закономерности процессов электролиза на УВЭ.

Для подтверждения их достоверности проводилось сравнение с полученными авторами данными экспериментальных исследований.

Влияние плотности тока. Проведенные авторами численные эксперименты показывают (рис. 1), что с ростом плотности поляризующего тока (до 1000 А/м²) наблюдается существенное возрастание общей скорости электрохимического процесса с дальнейшей ее стабилизацией, при этом, при определенном ϵ плотности тока происходит снижение выхода по току реакции $Fe(III) + e \rightleftharpoons Fe(II)$, что указывает на наличие побочных реакций образования металлического железа и газообразного водорода.

Результаты расчетов, приведенные, на рисунке 2, показывают увеличение неравномерности распределения концентрации трехвалентного железа по толщине ПТЭ с ростом поляризующего тока, что не противоречит теоретическим закономерностям процессов электролиза на ПТЭ.

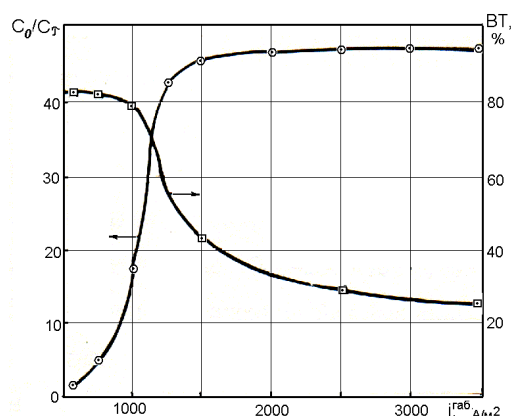


Рисунок 1 – Влияние плотности поляризующего тока на скорость восстановления трехвалентного железа до двухвалентного и выход по току рассматриваемой реакции. Параметры процесса: материал ВИНН-250; $S_v = 560$ см²/г; $\epsilon = 0,925$; $\chi_r = 0,4$ См/см; $L = 0,1$ см; $u = 0,1$ мл/с; исходная $C^{Fe(III)} = 8,9 \cdot 10^{-3}$ моль/л

Анализ результатов расчетов, приведенных на рисунке 3а показывает, что с ростом габаритного тока распределение парциальной поляризации реакции становится существенно неравномерным, при

этом минимум поляризации сдвигается в середину электрода, что характерно для случая сравнимых по величине электропроводностей твердой и жидкой фаз, имеющем место для рассматриваемой электрохимической системы. Расчеты показывают также, что при $j_k \approx 1200 \text{ A/m}^2$ достигается предельный ток по реакции $\text{Fe(III)} + e\text{Fe(II)}$, следовательно, дальнейшее увеличение плотности габаритного тока при прочих равных условиях не приводит к повышению скорости этой реакции.

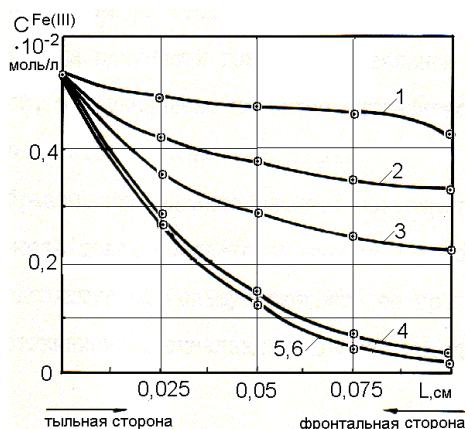


Рисунок 2 – Распределение концентрации ионов трехвалентного железа по толщине электрода.

Значения габаритного тока (A/m^2):

1 – 200; 2 – 300; 3 – 500; 4 – 1000; 5 – 1500 и 2000

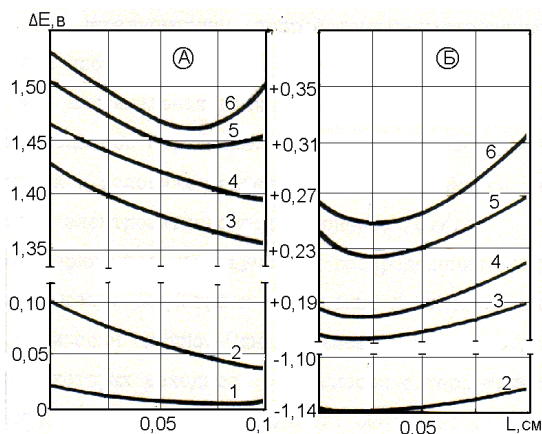


Рисунок 3 – Распределения парциальных поляризаций реакций $\text{Fe(III)} + e\text{Fe(II)}$ (А) и $\text{Fe(II)} + 2e\text{Fe}^0$ (Б) по толщине ПТЭ. Плотность поляризующего тока (A/m^2): 1 – 300; 2 – 500; 3 – 700; 4 – 1000; 5 – 3000; 6 – 5000

Сравнение характера распределений парциальных поляризаций реакций $\text{Fe(III)} + e\text{Fe(II)}$ и $\text{Fe(II)} + 2e\text{Fe}^0$ указывает на интересную закономерность положения минимума поляризации первой и второй реакции: в первом случае минимум расположен ближе к тыльной стороне электрода, а для второй реакции – к фронтальной стороне электрода. Такая же закономерность наблюдается и для максимальных значений парциальных поляризаций ПТЭ.

Одновременно рассмотрено и распределение локальных плотностей тока по толщине электрода (рис. 4). Для реакции $\text{Fe(III)} + e\text{Fe(II)}$ их значения на

тыльной стороне поверхности существенно выше, чем на фронтальной; эта разность возрастает с увеличением габаритной плотности тока до $1000 - 1500 \text{ A/m}^2$, оставаясь неизменной при его дальнейшем увеличении.

Для реакции $\text{Fe(II)} + 2e\text{Fe}^0$ наибольшие значения локальной плотности тока характерны для фронтальной стороны электрода. В интервале $1500 - 2000 \text{ A/m}^2$ разность между значениями тока на фронтальной и тыльной сторонах электрода невелика, но существенно возрастает с увеличением величины габаритной плотности тока до 300 A/m^2 и выше, что соответствует условиям, при которых происходит выделение металлического железа.

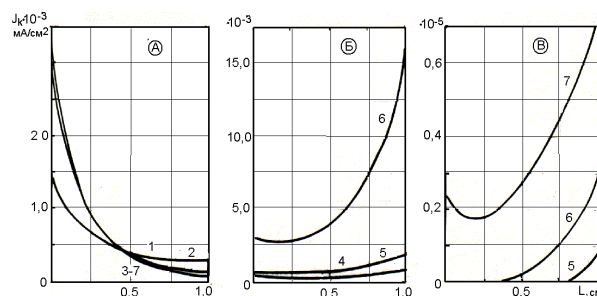


Рисунок 4 – Распределения парциальных плотностей тока реакций $\text{Fe(III)} + e\text{Fe(II)}$ (А), $\text{Fe(II)} + 2e\text{Fe}^0$ (Б) и $2\text{H}^+ + 2e \rightarrow \text{H}_2$ (В) по толщине ПТЭ при значениях габаритного тока (A/m^2): 1 – 500; 2 – 700; 3 – 1000; 4 – 1500; 5 – 2000;

6 – 3000; 7 – 5000

Как показали расчеты (рис. 4б), при плотности габаритного тока $\approx 2000 \text{ A/m}^2$ начинается процесс выделения газообразного водорода, что, естественно, приводит к снижению выхода по току для основной реакции выделения металлического железа, при этом водород интенсивнее выделяется на фронтальной стороне ПТЭ.

Обсуждение. Теоретическое исследование электрохимической системы с электродными реакциями последовательного восстановления железа $\text{Fe(III)} + e\text{Fe(II)}$, $\text{Fe(II)} + 2e\text{Fe}^0$; водорода: $2\text{H}^+ \rightarrow \text{H}_2$ и кислорода $\text{O}_2 \rightarrow 2\text{O}_{\text{адс.}}$; $\text{O}_{\text{адс.}} + 2\text{H}^+ + 2e \rightarrow \text{H}_2\text{O}$ позволяют получить наиболее полное представление о связи электрохимических процессов в рассматриваемой многокомпонентной системе и влиянии различных факторов на результаты электрохимических взаимодействий. Ранее исследования такого рода в полной мере, вероятно, не проводились, так как для их реализации необходимы математические модели и программные комплексы, позволяющие исследовать многостадийные процессы электроокисления и электровосстановления ионов металлов с учетом восстановления ионов водорода и молекулярного кислорода в проточном трехмерном электроде, подобные разработанным авторами данной публикации [10].

Известны публикации, например, [23], в которых представлены математические модели и численные исследования одно-, максимум, двухкомпонентных

систем, при этом процессы рассмотрены в статическом состоянии, без учета изменения характеристик электрода и электролита в процессе электроосаждения металла, что может существенно исказить численные результаты и их соответствие реальному процессу.

Сведения о существовании программных комплексов для расчета многокомпонентных электрохимических систем с ПТЭ, созданных другими авторами, авторами данной статьи в литературе не найдены. Решение заявленной задачи экспериментальными методами не представляется возможным из-за предельной сложности и громоздкости проведения необходимых экспериментов.

Выводы. Основным результатом данной публикации можно считать проведенные авторами методики расчета на основе математического моделирования распределения электроактивных компонентов при электровосстановлении ионов железа на проточном трехмерном электроде. Выполненное исследование, представленное в настоящей работе, показало, что плотность тока является одним из основных технологических параметров, позволяющих обеспечить высокую производительность рассматриваемых электрохимических процессов в объеме проточного трехмерного электрода из волокнистого углеродного материала.

Для проведения численных расчетов по приведенной математической модели был выбран ряд физических и кинетических параметров, в полной мере характеризующих исследуемую систему.

Дальнейшие изыскания в данном направлении могут быть связаны как с совершенствованием методов математического моделирования, например, возможности расчета многокомпонентных систем с растворами ионов других металлов, так и с экспериментальными исследованиями, необходимыми для определения электрохимических параметров и подтверждения результатов численных и теоретических выводов.

Необходима также дальнейшая работа над существующими программными комплексами [10] с целью повышения их универсальности, быстродействия и удобства для пользователей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Математическое моделирование и теория распределения поляризации в электрохимических реакторах с проточными объемно-пористыми катодами / А.Н. Кошев, В.К. Варенцов, М.А. Чиркина, В.Г. Камбург // Математическое моделирование. – 2011. – Т. 23. – № 8. – С. 110-126.
2. Кошев А.Н., Кузина В.В. Разработка и исследование математических моделей нестационарных процессов в электрохимических реакторах с проточными трехмерными электродами: моногр. Пенза: ПГУАС. – 2011. – 119 с.
3. Кошев А.Н., Варенцов В.К. Моделирование эффекта образования анодных зон на катодно поляризованном проточном трехмерном электроде // Математическое моделирование. – 2017. – Т. 29. – № 7. – С. 81-93.
4. Варенцов В.К., Батаев И.А. Ионообменные мембраны в процессах электроизвлечения золота из растворов на проточные углеродные волокнистые электроды // Мембраны и мембранные технологии. – 2017. – Т. 7. – № 5. – С. 344-351.
5. Варенцов В.К., Варенцова В.И. Электроосаждение металлов и их оксидов на электрохимически модифицированные трехмерные углеродные материалы // Физикохимия поверхности и защита материалов. – 2017. – Т. 53. – № 6. – С. 616-632.
6. Варенцов В.К., Кошев А.Н. Моделирование процесса газообразования водорода в проточных трехмерных электродах при извлечении металлов из растворов электролитов // Региональная архитектура и строительство. – 2017. – № 3 (32). – С. 128-135.
7. Окислительно-восстановительные процессы на трехмерных электродах. Математическое моделирование, теория, эксперимент: моногр. / В.К. Варенцов, А.Н. Кошев, В.И. Варенцова, В.В. Кузина. Пенза: ПГУАС. – 2020. – 172 с.
8. Варенцов В.К., Кошев А.Н., Варенцова В.И. Современные проблемы электролиза и задачи оптимизации процессов в реакторах с трехмерными углеродными электродами: моногр. Пенза: ПГУАС. – 2015. – 286 с.
9. Углеродные волокнистые электроды: свойства, модификация, процессы и электролизеры. Математическое моделирование и оптимизация: моногр. / В.К. Варенцов, А.Н. Кошев, В.И. Варенцова, В.В. Кузина. Пенза: ПГУАС. – 2021. – 176 с.
10. Гвоздева И.Г., Кошев А.Н., Воронцов А.А. Программный комплекс для расчета параметров электрохимического процесса в проточных углеродных волокнистых электродах. Св. о регистрации программы для ЭВМ 2022616439, 08.04.2022. Заявка № 2022614434 от 24.03.2022.
11. Mathematical modeling and simulation of electrochemical reactors: A critical review / F.F. Rivera, T. Pérez, L.F. Castañeda, J.L. Nava // Chemical Engineering Science. – 2021. Vol. 239, 116622. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2021.116622>.
12. Saleh M. Mathematical modeling of gas evolving flow-through porous electrodes // Electrochimica Acta. 1999. № 45(6). Pp.: 959-967. DOI:10.1016/S0013-4686(99)00296-0.
13. Варенцов В.К., Кошев А.Н., Сухов И.Ф. Процессы совместного электроосаждения золота и серебра из сернокислых растворов на проточном электроде // Теоретические основы химической технологии. – 2018. – Т. 52. – № 4. – С. 391-402.
14. Варенцов В.К., Жеребилов А.Ф., Малей М.Д. Углеродные волокнистые материалы – новые электроды для извлечения металлов из разбавленных растворов. 1. Нетканые углеродные волокнистые материалы // Изв. СО АН СССР. Сер. хим. наук. – 1984. – № 17. – Вып. 6. – С. 120-127.
15. Жеребилов А.Ф., Варенцов В.К. Углеродные волокнистые материалы – новые электроды для извлечения металлов из разбавленных растворов. 2. Тканые углеродные волокнистые материалы // Изв. СО АН СССР. Сер. хим. наук. – 1987. – № 2. – Вып. 1. – С. 110-115.
16. Ferreira B.K. Three-dimensional electrodes for the removal of metals from dilute solutions: A review // Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. 2008. № 29(4) – Pp. 330-371. DOI:10.1080/08827500802045586.
17. Graphite felt as a versatile electrode material: Properties, reaction environment, performance and applications. / L. Fabián, F.C. Walsh, J.L. Nava, C.P. de León // Electrochimica Acta. – 2017. – 258. DOI:10.1016/j.electacta.2017.11.165.
18. Ковалева О.В. Электрохимическое исследование редокс-процессов в железосодержащих водных растворах // Revista științifică a Universității de Stat din Moldova «Studia Universitatis», Seria «Științe ale Naturii». – 2009, nr. 6(26). – Pp. 195-203.
19. Ковалева О.В. Изучение кинетических закономерностей восстановления ионов Fe(III) до Fe(II) в концентрированных электролитах // Revista științifică a Universității de Stat din Moldova «Studia Universitatis», Seria «Științe ale Naturii». – 2013, nr. 6(26). – Pp. 195-203.
20. Справочник по электрохимии / Под ред. А.М. Сухотина. Л.: Химия. – 1981. – 488 с.
21. Феттер К. Электрохимическая кинетика. М.: Химия, 1967. – 856 с.
22. Фрумкин А.Н. Кинетика электродных процессов / А.Н. Фрумкин, В.С. Багоцкий, З.А. Иофа и др. М.: Изд. МГУ. – 1952. – 321 с.
23. Маслий А.И., Поддубный Н.П., Медведев А.Ж. Распределение габаритной плотности тока внутри пористого электрода с протоком раствора вдоль токоподвода. Влияние параметров электрода и электрохимических реакций // Электрохимия. – 2016. – Т. 52. – № 6. – С. 643-650.

Статья поступила в редакцию 18.07.2022

Статья принята к публикации 16.09.2022