

УДК 519.6

DOI: 10.46548/21vek-2021-1056-0002

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПРОТОЧНОМ ТРЕХМЕРНОМ ЭЛЕКТРОДЕ

© 2021

**Гвоздева Ирина Геннадьевна**, старший преподаватель кафедры  
«Информационно-вычислительные системы»

**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-mails: gvozd\_69@mail.ru, koshev@pguas.ru)

**Варенцов Валерий Константинович**, доктор технических наук, профессор,  
ведущий научный сотрудник лаборатории гетерогенных систем  
*Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН*

(630128, Россия, г. Новосибирск, ул. Кутателадзе, 18, e-mail: vvk@ngs.ru)

**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)

**Аннотация.** Рассмотрены математические аспекты моделирования процессов в проточных трехмерных электродах из углеродных волокнистых материалов. Представлены моделирующие уравнения и граничные соотношения при упрощениях и допущениях, которые часто правомерны при моделировании реальных электрохимических процессов в пористых средах. Приведенные положения и утверждения будут справедливы и в более общих случаях, таких как, например, многомерность модели, ее нестационарность в случае зависимости параметров модели и электрохимических констант от изменяющихся во времени технологических и реакционных условий процесса, а также при возможных корректировках управляющих параметров. Углеродные волокнистые материалы рассмотрены как новый тип электродов, которые могут использоваться для извлечения ионов тяжелых и цветных металлов из сточных вод промышленных предприятий. Цель исследования – получение представления о поведении электрохимической системы в зависимости от соотношения параметров и исследование режимов электролиза при малых плотностях тока методами математического моделирования. Приведены результаты расчетов с использованием пакета *MathCAD*, иллюстрирующих влияние некоторых параметров электрохимической системы на распределение потенциала по толщине электрода, а, следовательно, и на эффективность всего процесса электролиза. В результате исследования подтверждено, что даже при малых значениях поляризующего тока равномерность распределения потенциала, а, следовательно, и всего процесса достаточно чувствительна к параметрам электрохимической системы и может рассматриваться как критерий оптимизации.

**Ключевые слова:** математическое моделирование электрохимических процессов, проточные трехмерные электроды, углеграфитовые волокнистые материалы, очистка сточных вод от ионов металлов.

## MATHEMATICAL AND NUMERICAL SIMULATION OF ELECTROCHEMICAL PROCESSES IN A THREE-DIMENSIONAL FLOW ELECTRODE

© 2021

**Gvozdeva Irina Gennadievna**, senior lecturer of the department «Information and computing systems»

**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-mails: gvozd\_69@mail.ru, koshev@pguas.ru)

**Varentsov Valery Konstantinovich**, doctor of technical sciences, professor  
*Solid State Chemistry and Mechanochemistry of Siberian branch of Russian Academy of Science*  
(630128, Russia, Novosibirsk, st. Kutateladze, 18 E-mail: vvk@ngs.ru)

**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)

**Abstract.** Mathematical aspects of modeling processes in flowing three-dimensional electrodes made of carbon fiber materials are considered. Modeling equations and boundary relations are presented with simplifications and assumptions, which are often legitimate when modeling real electrochemical processes in porous media. The above provisions and statements will also be valid in more general cases, such as, for example, the multidimensionality of the model, its nonstationarity in the case of the dependence of the model parameters and electrochemical constants

on the technological and reaction conditions of the process varying in time, as well as with possible adjustments of the control parameters. Carbon fiber materials are considered as a new type of electrodes that can be used to extract heavy and non-ferrous metal ions from industrial wastewater. The purpose of the study is to obtain an idea of the behavior of the electrochemical system depending on the relationship of parameters and to study electrolysis modes at low current densities using mathematical modeling methods. The results of calculations using the MathCAD package are given, illustrating the influence of some parameters of the electrochemical system on the distribution of potential over the thickness of the electrode, and, therefore, on the efficiency of the entire electrolysis process. As a result of the study, it was confirmed that even with small values of the polarizing current, the uniformity of the distribution of the potential, and therefore of the whole process, is quite sensitive to the parameters of the electrochemical system and can be considered as an optimization criterion.

**Keywords:** mathematical modeling of electrochemical processes, flowing three-dimensional electrodes, carbon-graphite fibrous materials, wastewater treatment from metal ions.

**Введение.** Электрохимические системы с проточными трехмерными электродами (ПТЭ) из углеродных волоконных материалов (УВМ) обладают развитой реакционной поверхностью ( $4000-5000 \text{ см}^2/\text{г}$ ), что в сочетании с достаточно высокой электропроводностью и возможностью организации интенсивного массопереноса способно обеспечить электроосаждение значительного количества металла на единицу веса материала катода даже из электролитов малой концентрации ( $10^{-2}-10^{-7}$  моль/л) [1, 2].

Известны различные конструкции промышленных и опытно-промышленных реакторов с использованием углеродных волоконных электродов [3]. Один из вариантов конструкции ПТЭ представлен на рисунке 1. Описан опыт использования ПТЭ в различных процессах, в частности при извлечении металлов из разбавленных растворов, лабильзации комплексов платиновых металлов, создании замкнутых локальных процессов в гальванотехнике [4–9]. В то же время показано, что возможности интенсификации указанных электрохимических процессов на проточных трехмерных электродах из УВМ использованы далеко не полностью.

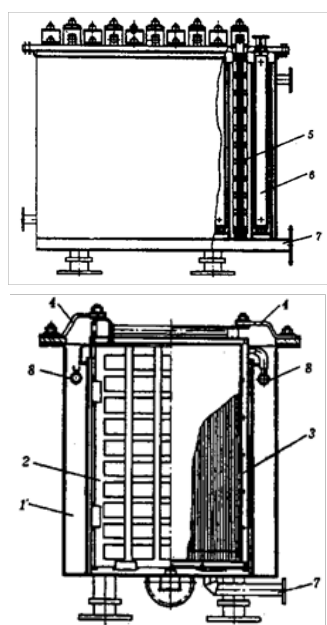


Рисунок 1 – Конструкция электролизера с камерами касетного типа: 1 – корпус, 2 – катодная камера, 3 – анодная камера, 4 – токоподводы, 5 – катод, 6 – анод, 7, 8 – трубопроводы

В силу большого количества факторов, влияющих на эффективность работы электролизеров с ПТЭ, определить оптимальные условия их эксплуатации возможно только при использовании математического моделирования, оптимизации и оптимального управления электрохимическими процессами, происходящими в порах проточных трехмерных электродов, в сочетании с экспериментальными методами.

Известны работы, например [10–18], посвященные построению математических моделей процессов в ПТЭ, от самых простых стационарных однокомпонентных одномерных моделей до сложных систем интегро-дифференциальных уравнений.

В данной работе авторами рассмотрены математические аспекты моделирования процессов в ПТЭ при упрощениях и допущениях, которые часто правомерны при моделировании реальных электрохимических процессов в пористых средах. Естественно, приведенные положения и утверждения будут справедливы и в более общих случаях, таких как, например, многомерность модели, ее нестационарность в случае зависимости параметров модели и электрохимических констант от изменяющихся во времени технологических и реакционных условий процесса, а также при возможных корректировках управляющих параметров (плотности подаваемого на ПТЭ тока, скорости потока электролита, электропроводности раствора и материала электрода и т.п.).

**Цель исследования** – получение представления о поведении электрохимической системы в зависимости от соотношения параметров и исследование режимов электролиза при малых плотностях тока методами математического моделирования.

**Методы и материалы исследования.** Математическая модель. Электрохимический процесс, при котором противоэлектроды электрохимического реактора представляют собой взаимно параллельные плоскости, а вектор направления потока электролита совпадает с направлением вектора силового электрического поля, можно описать одномерной математической моделью в виде дифференциального уравнения для неизвестных функций плотности тока  $J(x)$  и потенциала  $E(x)$ . Такая модель построена нами для случая, когда  $\kappa_T(x)$  и  $\kappa_{ж}(x)$  – электропроводности твердой и жидкой фазы – зависят от координаты точки на ПТЭ. Отметим, что математическая модель процесса, когда

$\kappa_T(x)$  и  $\kappa_{ж}(x)$  представляют собой постоянные величины, приведена в работе [10]. Используя те же принципы, как и в статье [10], нами получена математическая модель, учитывающая зависимость электропроводностей твердой и жидкой фаз от координаты электрода, подробный вывод которой приведен в работе [16]:

$$\frac{d^2 E}{dx^2} = \frac{-\kappa'_T(x)\kappa_{ж}}{\kappa_T(x)(\kappa_T(x) + \kappa_{ж})} \frac{dE}{dx} + S_v \left( \frac{1}{\kappa_T(x)} + \frac{1}{\kappa_{ж}} \right) J(x), \quad (1)$$

$$J(x) = j_0 \frac{\exp(\alpha ZFE(x)/RT) - \exp((\alpha-1)ZFE(x)/RT)}{1 + j_0 \exp(\alpha ZFE(x)/RT) / ZFK_m C(x)}; \quad (2)$$

$$\frac{dC}{dx} = -\frac{S_v}{vZF} J(x); \quad (3)$$

$$\frac{dE}{dx}(0) = -\frac{J}{\kappa_T(0)}; \quad \frac{dE}{dx}(L) = \frac{J}{\kappa_{ж}}; \quad C(0) = C_0. \quad (4)$$

В этих уравнениях  $S_v$  – удельная реакционная поверхность углеродистого материала;  $v$  – скорость потока раствора электролита;  $j_0$  – плотность тока обмена;  $K_m$  – коэффициент массопереноса;  $J$  – плотность поляризующего тока;  $C(x)$  – концентрация электроактивного компонента. Модели для расчета профиля электропроводности электрода  $\kappa_T(x)$  описаны, например, в статье [19].

Дифференциальные уравнения (1) – (4) можно использовать для расчета электрохимического процесса в проточных трехмерных электродах для большинства электролизеров с ПТЭ, используемых в практике извлечения благородных и цветных металлов. Если процесс извлечения металла сопровождается выделением существенного количества водорода, то математическую модель (1) – (4) необходимо дополнить уравнениями, приведенными в нашей работе [20].

Моделирование начальных значений потенциала электрода, как начальных данных для решения задачи Коши.

Для решения дифференциальных уравнений (1) – (4) как задачи Коши необходимо знать начальное значение потенциала  $E(0) = E_0$ , которое, в общем случае, нельзя получить теоретическим или экспериментальным путем. Для решения таких задач обычно применяется так называемый «метод стрельбы», когда из тех или иных соображений задается начальное значение для производной, задача Коши решается, а затем решение уточняется путем варьирования начального значения  $E_0$  в зависимости от точности попадания решения в известное конечное значение для производной  $dE(0)/dx = J/\kappa_T(0)$ .

Запишем уравнение для плотности поляризующего тока (2) в упрощенном виде:  $J_s(x) = j_0(e^{AE(x)} - e^{-CE(x)})$ , где  $A = \alpha ZF/RT$ ,  $C = (1-\alpha)ZF/RT$ ,  $B = (1/\kappa_T + 1/\kappa_{ж})S_v$ , применим технику интегрирования уравнения (1), как это было сделано нами в работе [15], окончательно получим формулу для оценки начального значения потенциала электрода в точке  $x = 0$ :

$$E(0) \approx \frac{2}{A} \ln \left( \frac{AJ}{2\kappa_T^2 B j_0} \right). \quad (5)$$

Эта формула успешно применяется нами при решении систем типа (1) – (4) при расчете электрохимических процессов в реакторах с проточными трехмер-

ными электродами.

*Моделирование процессов в ПТЭ процесса при малых габаритных плотностях тока.* Введем обозначения комплексов электролитических параметров:

$$E(0) = E_0; \quad E'(0) = E_1 = -\frac{j}{\kappa_T}; \quad C(0) = C_0; \quad K_1 = \frac{\kappa_T + \kappa_{ж}}{\kappa_{ж}\kappa_T} S_v j_0;$$

$$K_2 = \frac{\alpha ZF}{RT}; \quad K_3 = \frac{(1-\alpha)ZF}{RT}; \quad K_5 = ZFK_m;$$

$$K_6 = \frac{\kappa_T \kappa_{ж} K_m}{(\kappa_T + \kappa_{ж})v}; \quad K_7 = \frac{S_v j_0}{vZF}; \quad K_8 = j_0 - \frac{J \kappa_{ж} K_m}{(\kappa_T + \kappa_{ж})} + C_0 ZFK_m;$$

$$K_9 = K_1 K_6 (K_2 + K_3); \quad K_{10} = E_1 - \frac{C_0 \cdot K_1}{K_7}; \quad K_{11} = \frac{K_9 (E_1 - K_{10}) E_0}{2(K_8 + K_2 K_4 E_0 + K_6 E_1)}.$$

Математическая модель окислительно восстановительного процесса в электрохимической системе с проточными объемно пористыми электродами записывается в виде системы дифференциальных уравнений, связывающих между собой распределение потенциала электрода  $E(x)$  и концентрации  $C(x)$ , где  $x$  – координата по толщине электрода, имеет вид:

$$\frac{d^2 E}{dx^2} = K_1 \left( \frac{\exp(K_2 E) - \exp(-K_3)}{1 + K_4 \exp(K_2 E) / K_5 C(x)} \right); \quad (6)$$

$$\frac{dC}{dx} = K_7 \left( \frac{\exp(K_2 E) - \exp(K_3 E)}{1 + \exp(K_2 E) / (K_5 C(x))} \right).$$

Решая эту систему (6) с начальными условиями:  $E(0) = E_0$ ,  $E'(0) = E_1$ ,  $C(0) = C_0$ , получим приближенные формулы для расчета распределения потенциала и концентрации по толщине электрода:

$$E(x) \approx E_0 + E_1 x + \frac{C_0 K_1 E_0}{2(K_8 + K_2 K_4 E_0 + K_6 E_1)} x^2; \quad (7)$$

$$C(x) \approx \frac{K_9}{K_1} \times \left( \frac{C_0 K_1 + \frac{C_0 K_1 E_0}{K_8 + K_2 K_4 E_0 + K_6 E_1} x + \left( \frac{C_0 K_1 E_1 + 2K_{11}(K_9 E_0 - E_1 K_2 K_4 - 2K_6 K_{11})}{4K_{11}(K_8 + K_2 K_4 E_0 + K_6 E_1)} x^2 \right) \right). \quad (8)$$

Следовательно,

$$E(0) = \frac{2 \left( \frac{J}{\kappa_T} K_6 - K_8 \right) \left( \frac{J}{\kappa_T} + \frac{J}{\kappa_{ж}} \right)}{\left( \frac{J}{\kappa_T} + \frac{J}{\kappa_{ж}} \right) K_2 K_4 - 2C_0 K_1 L};$$

$$C(L) \approx \frac{K_9}{K_1} \left( \frac{C_0 K_1 + \frac{C_0 K_1 E_0 L}{K_8 + K_2 K_4 E_0 + K_6 E_1} + \frac{C_0 K_1 E_1 + 2K_{11}(K_9 E_0 - E_1 K_2 K_4 - 2K_6 K_{11})}{4K_{11}(K_8 + K_2 K_4 E_0 + K_6 E_1)} L^2 \right).$$

Представление решения системы дифференциальных уравнений (6) в виде выражений (7), (8), естественно, правомерно только при достаточно малых величинах плотности поляризующего тока  $J$ , подаваемого на электрод. Многочисленные контрольные расчеты позволили нам определить границу значений поляризующего тока для различных соотношений параметров и констант электрохимического процесса, при которых правомерно использование такой математической модели. Эта граница определена нами, как  $10^{-3}$  А/см<sup>2</sup>. Для электрохимических параметров, принимающих значения из интервалов, приведенных в таблице 1, посредством численных решений системы дифференциальных уравнений (6) получены следующие величины экспонент, присутствующих в правых частях системы (6): при  $J = 10^{-3}$  А/см<sup>2</sup>  $\rightarrow e^{K_2 E} \div 1,042 - 1,48$ ; при  $J = 10^{-4}$  А/см<sup>2</sup>  $\rightarrow e^{K_2 E} \div 1,004 - 1,09$ ; при  $J = 10^{-5}$  А/см<sup>2</sup>  $\rightarrow e^{K_2 E} \div 1,007 - 1,03$ .

Очевидно, что при таких значениях экспоненты,

близких к единице, экспоненциальная функция раскладывается в ряд до членов второго порядка с достаточной точностью (табл. 1).

Таблица 1 – Величины экспонент, полученные посредством численных решений системы дифференциальных уравнений (6)

Наименование параметра	обозначение	значение параметра
электропроводность твердой фазы	$\kappa_T$	0,1-1 См·См
электропроводность жидкой фазы	$\kappa_{ж}$	0,1 См·См
скорость протока	$v$	0,01-0,5 см/с
Плотность тока	$J$	$10^{-3}$ - $10^{-7}$ А/см <sup>2</sup>
Плотность тока обмена	$J_0$	$10^{-5}$ - $10^{-8}$ А/см <sup>2</sup>
концентрация ионов металла	$C_0$	$10^{-7}$ - $10^{-4}$ моль/см <sup>3</sup>
коэффициент переноса	$a$	0,3-0,5

Исследование поведения системы методом мате-

матического моделирования с использованием пакета *MathCAD* при плотностях токов, указанных в таблице 1, во-первых, позволяет получить некоторое представление о поведении электрохимической системы в зависимости от соотношения параметров, и, во-вторых, исследовать режимы электролиза при малых плотностях тока, с целью получения равномерного начального покрытия объемно-пористого электрода в качестве подготовки к эффективному протеканию основного процесса электроосаждения.

На рисунке 2 в качестве иллюстрации приведено распределение потенциала по толщине ПТЭ при значении электропроводности твердой фазы 0,1 См·см и средних значениях других электрохимических параметров.

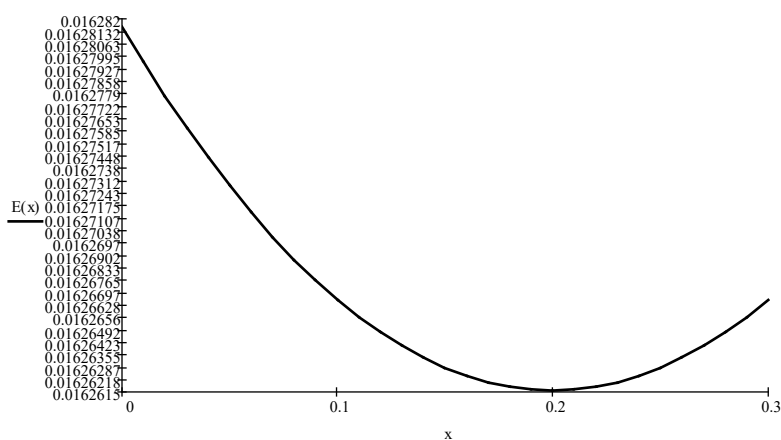


Рисунок 2 – Распределение потенциала по толщине ПТЭ

**Результаты исследования.** Результаты расчетов, иллюстрирующих влияние некоторых параметров электрохимической системы на распределение потенциала по толщине электрода, а, следовательно, на эффективность всего процесса электролиза, позволяют сделать следующие выводы:

- величина плотности тока значительно влияет на равномерность распределения потенциала по толщине электрода. Увеличение плотности тока от  $10^{-6}$  до  $10^{-4}$  А/см<sup>2</sup> приводит к улучшению равномерности распределения потенциала. Это обусловливается тем, что при малых значениях габаритного тока значения потенциала в средних точках электрода близки к нулю.
- величина концентрации осаждаемых ионов металла также неоднозначно влияет на равномерность процесса, но её варьирование в пределах  $10^{-7}$ – $10^{-5}$  моль/см<sup>3</sup> не существенно изменяет распределение потенциала на ПТЭ.
- снижение скорости протока относительно среднего значения ухудшает распределение потенциала.
- изменение тока обмена электрохимической реакции в пределах от  $10^{-5}$ – $10^{-8}$  А/см<sup>2</sup> не оказывает существенного влияния на равномерность распределения потенциала.
- увеличение электропроводности твердой фазы системы, как и ожидалось, влечет за собой некоторое улучшение равномерности распределения потенциала.

• изменение коэффициента переноса в пределах значений от 0,3 до 0,5 незначительно ухудшает распределение процесса по толщине пористого электрода.

**Закключение.** В результате выполненного исследования, приведенного в настоящей работе, получена математическая модель, описывающая электрохимические процессы, проходящие в объеме трехмерного проточного электрода из углеродистого волокнистого материала, в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений. Получены формулы для определения значений краевых условий, налагаемых на неизвестные функции, что позволило представить задачу в виде классической задачи Коши для системы дифференциальных уравнений. Проведенные численные расчеты показали, что даже при малых значениях поляризующего тока, равномерность распределения потенциала, а, следовательно, и всего процесса, достаточно чувствительна к параметрам электрохимической системы и может рассматриваться как критерий оптимизации процесса в ПТЭ по электрохимическим и технологическим параметрам.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. 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.



2. Варенцов, В.К. Современные проблемы электролиза и задачи оптимизации процессов в реакторах с трехмерными углеродными электродами: моногр. / В.К. Варенцов, А.Н. Кошев, В.И. Варенцова. – Пенза: ПГУАС, 2015. – 286 с.
3. Варенцов, В.К. Современные проблемы технической электрохимии. Ч. III. Электрохимические реакторы и процессы с проточными углеродными электродами / В.К. Варенцов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2007. – 124 с.
4. Окислительно-восстановительные процессы на проточных трехмерных электродах. Математическое моделирование. Теория. Эксперимент: моногр. / В.К. Варенцов, А.Н. Кошев, В.И. Варенцова, В.В. Кузина. – Пенза: ПГУАС, 2020. – 172 с.
5. Варенцов, В.К. Современные проблемы технической электрохимии. Ч. II. Электролиз с проточными углеродными электродами в гальванотехнике / В.К. Варенцов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006. – 105 с.
6. Варенцов В.К. Электролиз с трехмерными электродами в процессах регенерации металлов из промывных растворов гальванических производств / В.К. Варенцов // Изв. СО АН СССР, Сер. хим. наук, 1988, № 9/3. – С. 124–138.
7. Ковалёва О.В. Интенсификация электрохимических процессов регенерации быстроокисляющихся электролитов железнения / О.В. Ковалёва, В.М. Шайдулин, В.К. Варенцов // Малоотходные и ресурсосберегающие процессы в гальванотехнике: материалы семинара. – М.: ИДНТП, 1988. – С. 55–58.
8. Перельгин Ю.П. Реакции на катоде при электроосаждении металлов. / Ю.П. Перельгин, С.Ю. Киреев, Ю.Н. Кирилина. // Гальванотехника и обработка поверхности, 2019, Т. 27, № 4. – С. 28–32.
9. Maarof H.I. Recent trends in removal and recovery of heavy metals from wastewater by electrochemical technologies / H.I. Maarof, W.M.A.W. Daud, M.K. Aroua // Heavy metal removal and recovery, 2016, Vol. 33. – P. 1–28.
10. Даниель-Бек В.С. К вопросу о поляризации пористых электродов / В.С. Даниель-Бек // Журнал физической химии, 1948, Т. 22. – С. 697–710.
11. Гуревич Н.Г. Работа жидкостных пористых электродов в режиме с вынужденной подачей реагентов / Н.Г. Гуревич, В.С. Баготский // Инженерно-физический журнал, 1963, Т. 6, № 2. – С. 75–86.
12. An improved model of potential and current distribution within a flow-through porous electrode / T. Doherty, J.G. Sunderland, P.L. Roberts, D.J. Pickett // Electrochem. Acta, 1996, Т. 41, № 4. – P. 519–526.
13. Замятин А.П. Компьютерная диагностика свойств и комплексный анализ состава технологических растворов при оптимизации процессов гальванических производств / А.П. Замятин, Р.Ю. Бек // Химия в интересах устойчивого развития, 1997, Т. 5. – С. 479–490.
14. Теоретические основы и моделирование электрохимических процессов в системах с проточными трехмерными электродами: моногр. / В.К. Варенцов, А.Н. Кошев, И.Ф. Сухов, В.В. Кузина. – Пенза: ПГУАС, 2014. – 128 с.
15. Кошев А.Н. Разработка и исследование математических моделей нестационарных процессов в электрохимических реакторах с проточными трехмерными электродами: моногр. / А.Н. Кошев, В.В. Кузина. – Пенза: ПГУАС, 2011. – 119 с.
16. Гвоздева И.Г. Управление электрохимическим реактором с проточными трехмерными электродами за счет оптимального распределения электропроводности системы / И.Г. Гвоздева, А.Н. Кошев, В.К. Варенцов // Управление большими системами, 2010, № 29. – С. 184–200.
17. Кузина В.В. Математические модели для автоматизированного контроля концентрации ионов металлов в промышленных стоках / В.В. Кузина, А.П. Замятин, А.Н. Кошев // Автоматизация и современные технологии, 2008, № 11. – С. 38–43.
18. Кузина В.В. Математические модели в задачах вольтамперометрического анализа / В.В. Кузина, А.П. Замятин, А.Н. Кошев // Экологические системы и приборы, 2006, № 8. – С. 37–41.
19. Кошев А.Н. Влияние заполнения проточного объемно-пористого катода осаждающимся металлом на электропроводность твердой фазы системы электрод-электролит / А.Н. Кошев, В.К. Варенцов, Г.Н. Глейзер. // Электрохимия, 1992, Т. 28, № 8. – С. 1170–1176.
20. Варенцов, В.К. Моделирование процесса газообразования водорода в проточных трехмерных электродах при извлечении металлов из растворов электролитов / В.К. Варенцов, А.Н. Кошев // Региональная архитектура и строительство, 2017, № 3 (32). – С. 128–135.

*Статья поступила в редакцию 27.10.2021*

*Статья принята к публикации 07.12.2021*