

Р.М. Гусейнов, Х.М. Махмудов, Р.А. Раджабов, З.Н. Бахмудкадиева, З.А. Зайнутдинова

Ризван Меджидович Гусейнов (✉), Зумруд Нухкадиевна Бахмудкадиева, Зарипат Арсланалиевна Зайнутдинова
Кафедра химии, Дагестанский государственный педагогический университет, 367003 Республика Дагестан,
Махачкала, ул. М. Ярагского, д. 57, Российская Федерация
E-mail: rizvanguseynov@mail.ru (✉)

Хейрулла Магомедович Махмудов

Кафедра теоретических основ и технологии начального математического образования,
Дагестанский государственный педагогический университет, 367003, Республика Дагестан,
Махачкала ул. М. Ярагского, д. 57, Российская Федерация

Раджаб Абдулганиевич Раджабов

Кафедра информационных технологий, Дагестанский государственный педагогический университет,
367003, Республика Дагестан, Махачкала ул. М. Ярагского, д. 57, Российская Федерация
E-mail: radjab67@mail.ru

КИНЕТИКА ЗАРЯЖЕНИЯ ГРАНИЦЫ БЛОКИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОД – ТВЕРДЫЙ ЭЛЕКТРОЛИТ В ГАЛЬВАНОДИНАМИЧЕСКОМ И ПОТЕНЦИОДИНАМИЧЕСКОМ РЕЖИМАХ. СЛУЧАЙ ЗАМЕДЛЕННОЙ ДИФФУЗИИ И АДСОРБЦИИ – ДЕСОРБЦИИ ДВУХ РАЗНЫХ СОРТОВ ЧАСТИЦ

Методом операционного импеданса в двух режимах – гальванодинамическом и потенциодинамическом – исследована кинетика процесса заряжения межфазной границы блокированный (инертный) электрод – твердый электролит позиции эквивалентной электрической модели Джекобсена и Веста, справедливой для относительно больших времен заряжения. В процессе замедленной диффузии и адсорбции-десорбции учитывается участие двух разных сортов электрохимически активных частиц.

Ключевые слова: операционный импеданс; твердый электролит; эквивалентная электрическая схема

R.M. Guseynov, Kh.M. Makhmudov, R.A. Radgabov, Z.N. Bakhmudkadieva, Z.A. Zaiynutdinova

Rizvan M. Guseynov (✉), Zumrud N. Bakhmudkadieva, Zariyat A. Zaiynutdinova
Department of Chemistry, Dagestan State Pedagogical University, 367003 Makhachkala, Yaragskogo Str., 57, Russia
E-mail: rizvanguseynov@mail.ru (✉)

Kheiyrulla M. Makhmudov

Department of theoretical bases and technology of primary mathematical education, Dagestan State Pedagogical University, 367003 Makhachkala, Yaragskogo Str., 57, Russia

Radzhab A. Rabzhabov

Department of information technologies, Dagestan State Pedagogical University, 367003 Makhachkala,
Yaragskogo Str., 57, Russia
E-mail: radjab67@mail.ru

KINETICS OF CHARGING INTERFACE OF BLOCKED ELECTRODE-SOLID ELECTROLYTE IN GALVANODYNAMIC AND POTENTIODYNAMIC MODES. CASE OF DELAYED DIFFUSION AND ADSORPTION-DESORPTION OF TWO PARTICLE OF DIFFERENT KIND

The kinetics of charging the blocked (inert) electrode/ solid electrolyte interface was studied by operational impedance method in the galvanodynamic and potentiodynamic modes. For calculations the equivalent electrical scheme of Jacobsen and West method was used which is suitable in the case of long time of charging. The participation of two different electrochemically active particles in a process of delayed diffusion and adsorption-desorption was taken into account.

Key words: operational impedance, solid electrolyte, equivalent electrical scheme

ВВЕДЕНИЕ

Исследование кинетики формирования двойного электрического слоя на межфазной границе блокированный (инертный) электрод – твердый электролит в гальванодинамическом (методе линейной развертки тока) и потенциодинамическом (методе линейной развертки потенциала) режимах было проведено нами ранее [1]. В работе [1] нами был анализирован случай замедленной диффузии и адсорбции – десорбции одного сорта частиц, а именно дефектов жесткой части решетки твердого электролита (например, ионов йода Γ в твердом электролите Ag_4RbI_5).

В действительности же в твердых электролитах, синтезированных на основе йодида серебра AgI , ввиду возможного частичного разложения электролита помимо ионов Γ присутствует также молекулярный йод I_2 [2]. Поэтому в настоящей работе нами анализируется случай замедленной диффузии и адсорбции-десорбции двух разных сортов частиц.

Исследуемая в данной работе межфазная граница блокированный электрод – твердый электролит характеризуется тем, что на ней в результате эффекта поверхностного накопления заряда происходит формирование двойного электрического слоя (ДЭС). А ДЭС, как известно [3], является важнейшим элементом большинства электрохимических приборов на основе твердых электролитов (ТЭЛ), таких как ионисторы, твердотельные электролитические конденсаторы и другие хемотронные устройства.

Многие из перечисленных выше электрохимических устройств функционируют в режимах линейной развертки потенциала или тока, а также в импульсных режимах заряда-разряда. В этом заключается актуальность, а также теоретическая и практическая значимость проводимых нами исследований, в том числе и настоящей работы.

Для теоретических расчетов в настоящей работе применяется эквивалентная электрическая модель, предложенная Джекобсоном и Вестом, справедливая для относительно «больших» времен, изображенная на рис. 1.

Под относительно «большими» или «малыми» временами следует понимать характерные времена, отвечающие рассматриваемой эквивалентной электрической схеме и определяющиеся значениями параметров суммарного сопротивления R и суммарной емкости C условной RC – ячейки, $t = RC$. Произведенный нами специальный расчет параметров эквивалентной электрической модели Джекобсона и Веста приводит к величине постоянной ячейки RC , равной 37 мкс. Следова-

тельно, нижняя граница относительно «больших» времен начинается с 37 мкс. Поскольку частота является обратным аналогом времени, то верхний предел частот переменного тока, при котором эквивалентная электрическая схема рассматриваемой ячейки может функционировать нормально, составляет 28 кГц.

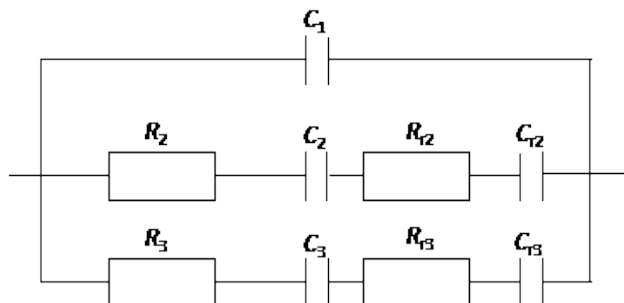


Рис. 1. Эквивалентная электрическая схема ячейки с границей блокированный электрод – твердый электролит в случае больших времен заряжения и замедленной диффузии и адсорбции-десорбции двух сортов частиц (согласно модели Джекобсона и Веста). C_1 – емкость адсорбции-десорбции, обусловленная основными ионами ТЭЛ (ионами серебра в твердом электролите); R_2 и C_2 , R_3 и C_3 – соответственно сопротивление и емкость адсорбции – десорбции дефектов 1-го и 2-го сортов; R_{r2} и C_{r2} , R_{r3} и C_{r3} – сопротивление и емкость, обусловленные геометрией электродов (в случае сферического или цилиндрического типа) для дефектов 1-го и 2-го сортов соответственно

Fig. 1. Equivalent electric scheme of cell with interface of blocked electrode-solid electrolyte in the case of large time of charging and delayed diffusion and adsorption-desorption of two kind particles (according to Jacobsen – West model). C_1 – capacity of adsorption-desorption conditioned with the main ions; R_2 and C_2 , R_3 and C_3 – resistance and capacity of adsorption-desorption of defects of the first and second kind, respectively; R_{r2} and C_{r2} , R_{r3} and C_{r3} – resistance and capacity conditioned with electrodes geometry (in the case of spherical or cylindrical type) for defects of the first and second kind, respectively

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

1.1. Гальванодинамический режим

Операционный импеданс ячейки, вычисленный нами в соответствии с эквивалентной электрической схемой, изображенной на рис.1, может быть представлен в виде выражения (1)

$$z p = \frac{p^2 k + p n + d}{p^2 a + p b + c}, \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{где } a &= C_1 R_2 + R_{r2} C_2 C_{r2} R_3 + R_{r3} C_3 C_{r3}; \\ b &= C_1 R_2 + R_{r2} C_2 C_{r2} C_{r3} + C_3 + C_1 C_{r2} + C_2 \times \\ &\quad \times R_3 + R_{r2} C_3 C_{r3} + C_2 C_{r2} R_3 + R_{r3} C_3 C_{r3} \\ &\quad + C_3 C_{r3} R_2 + R_{r2} C_2 C_{r2}; \\ c &= C_1 C_{r2} + C_2 C_{r3} + C_3 + C_2 C_{r2} C_{r3} + C_3 + \\ &\quad + C_3 C_{r3} C_{r2} + C_2; \\ k &= R_2 + R_{r2} C_2 C_{r2} R_3 + R_{r3} C_3 C_{r3}; \\ n &= R_2 + R_{r2} C_2 C_{r2} C_{r3} + C_3 + C_{r2} + C_2 R_3 + \\ &\quad + R_{r3} C_3 C_{r3}; \\ d &= C_{r2} + C_2 C_{r3} + C_3; \end{aligned}$$

Поскольку в гальванодинамическом режиме (в методе линейной развертки тока) $i t = I_0 + \vartheta t$ (где I_0 – начальное значение тока, ϑ – скорость линейной развертки тока), то при $I_0 = \text{Const}$ изображение по Лапласу функции $i(t)$ равно $i(p) = \vartheta/p^2$.

Поскольку $\varphi p = i p z(p)$, то для операционного потенциала получим соотношение

$$\varphi p = \frac{\vartheta p^2 k + p n + d}{p^3 p^2 + p b + c}. \quad (2)$$

Разделим все члены в выражении (2) на постоянную a , и тогда оно принимает вид

$$\varphi p = \frac{\vartheta p^2 k' + p n' + d'}{p^3 p^2 a + p b' + c'}, \quad (2a)$$

где

$$b' = \frac{b}{a}; c' = \frac{c}{a}; k' = \frac{k}{a}; n' = \frac{n}{a}; d' = \frac{d}{a}.$$

Выражение (2a) как дробно-рациональное может быть разложено на сумму простейших дробей

$$\varphi p = \frac{\vartheta p^2 k' + p n' + d'}{p^3 p^2 a + p b' + c'} = \frac{d_1}{p^3} + \frac{d_2}{p^2} + \frac{d_3}{p} + \frac{d_4}{p - m_1} + \frac{d_5}{p - m_2} \quad (3)$$

Где m_1 и m_2 – корни (нули) характеристического уравнения второй степени $p^2 + p b' + c' = 0$,

равные $-\frac{b'}{2} \pm \sqrt{\frac{b'^2}{4} - c'}$.

Значения коэффициентов d_1, d_2, d_3, d_4 и d_5 , найденные путем решения системы соответствующих уравнений, равны

$$d_1 = \frac{\vartheta d'}{m_1 m_2} = \frac{\vartheta d'}{c'} \quad (4)$$

$$d_2 = \frac{(\vartheta n' - d_1 b')}{c'} \quad (5)$$

$$d_3 = \frac{(\vartheta k' - d_1 - d_2 b')}{c'} \quad (6)$$

$$d_4 = \frac{d_2 - d_3 (b' - 1)}{m_2 - 1} \quad (7)$$

$$d_5 = -d_4 - d_3. \quad (8)$$

С помощью таблиц обратного преобразования Лапласа [5, 6] можно выполнить почленный переход выражения (3) в пространство оригиналов, в результате чего получим для потенциала заряжения исследуемой межфазной границы следующее соотношение

$$\varphi t = \frac{d_1 t^2}{2} + d_2 t + d_3 + d_4 \exp m_1 t + d_5 \exp m_2 t \quad (9)$$

Полученное для потенциала выражение (9) функционально отличается от аналогичного соотношения, выведенного ранее нами для случая замедленной диффузии и адсорбции-десорбции одного сорта частиц [1] наличием дополнительного экспоненциального члена.

Уравнение (9) с учетом всех входящих в него параметров принимает окончательный вид

$$\varphi t = \frac{0,4396 \cdot 10^3 t^2}{2} + 0,02520 \cdot t + 0,00317 \cdot 10^{-3} + 0,0031212 \cdot 10^3 \cdot \exp -2,232 \cdot 10^3 t - 0,00629 \cdot 10^{-3} \exp -371,928 \cdot 10^3 t \quad (10)$$

На рис. 2 представлен график зависимости потенциала заряжения межфазной границы блокированный электрод – твердый электролит от времени, построенный в соответствии с уравнением (10) при следующих значениях удельных параметров эквивалентной электрической схемы, изображенной на рис. 1:

$$\begin{aligned} S_{эл} &= 1 \text{ см}^2; C_1 = 2 \cdot 10^{-6} \text{ Ф см}^2; \\ C_2 &= 40 \cdot 10^{-6} \text{ Ф см}^2; R_2 = 8 \text{ Ом} \cdot \text{см}^2; \\ R_{r2} &= 2 \text{ Ом} \cdot \text{см}^2; \vartheta = 5 \cdot 10^{-3} \text{ А см}^2 \cdot \text{с}; \\ C_{r2} &= 10 \cdot 10^{-6} \text{ Ф см}^2; C_{r3} = 15 \cdot 10^{-6} \text{ Ф см}^2; \\ R_{r3} &= 30 \text{ Ом} \cdot \text{см}^2; R_3 = 20 \text{ Ом} \cdot \text{см}^2; \\ C_3 &= 20 \cdot 10^{-6} \text{ Ф см}^2; d_1 = 439,698 \text{ В с}^2; \\ d_2 &= 0,2520 \text{ В с}; d_3 = 3,16 \cdot 10^{-6} \text{ В}; \\ d_4 &= 0,00312 \cdot 10^{-3} \text{ В}; d_5 = 0,00629 \cdot 10^{-3} \text{ В}; \\ m_1 &= -2,232 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}; m_2 = -371,928 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}; \\ b' &= 374,16 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}; \\ c' &= 829,166 \cdot 10^6 \text{ с}^{-2}; n' = 3,708 \cdot 10^{10} \text{ с}^{-1} \cdot \text{Ф}^{-1}; \\ k' &= 2,5 \cdot 10^6 \text{ Ф}^{-1}; d' = 24 \cdot 10^{24} \text{ с}^{-2} \cdot \text{Ф}^{-1}. \end{aligned}$$

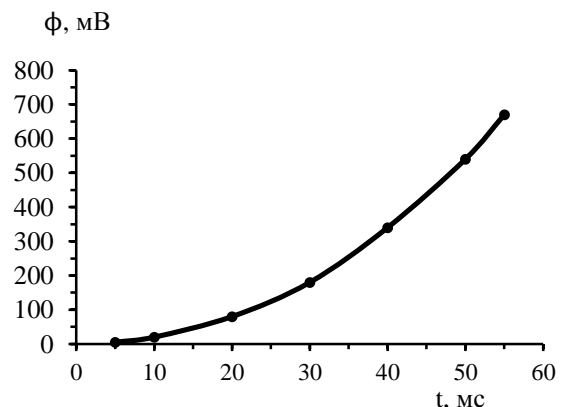


Рис. 2. График зависимости потенциал – время, построенный в соответствии с уравнением (10) в случае замедленной диффузии и адсорбции – десорбции двух разных сортов частиц (пояснения в тексте статьи)

Fig. 2. Curve of potential-time dependence plotted on equation (10) in the case of delayed diffusion and adsorption-desorption of two different kind particles (see explanation in a text)

Два последних члена в соотношении (10) при временах, равных 5 с и выше, существенно меньше остальных, вследствие чего ими можно пренебречь.

Как видно из табл. 1, основной вклад в величину потенциала межфазной границы блокированный электрод – твердый электролит вносит первый член в уравнении (10), вклад же остальных членов при заданных значениях параметров эквивалентной электрической схемы и исследуемых временах заряжения незначителен.

Таблица 1

Значения составляющих уравнения (10) для потенциала межфазной границы инертный электрод – твердый электролит в гальванодинамическом режиме заряжения ячейки

Table 1. The values of terms of the equation (14) for the potential of interface of blocked (inert) electrode – solid electrolyte at galvanodynamic mode of cell charging

t, c	$(d_1 t^2)/2, \text{ мВ}$	$d_2 t$	d_3
5	5,49	0,1260	0,00317·10 ⁻³
10	21,95	0,2520	0,00317·10 ⁻³
20	87,94	0,50407	0,00317·10 ⁻³
30	197,86	0,7561	0,00317·10 ⁻³
40	351,76	1,0081	0,00317·10 ⁻³
50	549,60	1,2602	0,00317·10 ⁻³
60	665,04	1,3862	0,00317·10 ⁻³

1.2. Потенциодинамический режим

Поскольку в потенциодинамическом режиме $\varphi(t) = \varphi_0 + \vartheta t$ (где φ_0 – начальное значение потенциала, а ϑ – скорость его линейной развертки), то при $\varphi_0 = 0$ изображение по Лапласу функции $\varphi(t)$ равно $\varphi(p) = \vartheta/p^2$.

Но поскольку $i(p) = \varphi(p)/Z(p)$, то подставляя в последнее соотношение значения $Z(p)$ и $\varphi(p)$ получаем для тока заряжения исследуемой границы следующее соотношение

$$i p = \frac{\vartheta p^2 a + p b + c}{p^2 p^2 k + p n + d} = \frac{\vartheta p^2 a + p b + c}{p p^2 k + p n + d} \quad (11)$$

Все члены как числителя, так и знаменателя в выражении (11) разделим на постоянную k , и тогда уравнение (15) можно переписать в виде

$$i p = \frac{\vartheta p^2 a' + p b' + c'}{p p^2 + n' p + d'} \quad (12)$$

где $a' = a k$; $b' = b k$; $c' = c k$; $n' = n k$; $d' = d k$.

Выражение (12) может быть разложено на сумму простейших дробей

$$i p = \frac{d_1}{p} + \frac{d_2}{p - m_1} + \frac{d_3}{p - m_2} \quad (13)$$

где m_1 и m_2 – корни (нули) характеристического уравнения второй степени $p^2 + n' p + d' = 0$, равные

$$-\frac{n'}{2} \pm \sqrt{\frac{n'^2}{4} - d'}$$

Для определения коэффициентов d_1 , d_2 и d_3 соотношение (13) приведем к следующему виду

$$i p = \frac{\vartheta p^2 a' + p b' + c'}{p(p^2 + n' p + d')} = \frac{p^2 d_1 + d_2 + d_3 - p d_1 m_2 + d_1 m_1 + d_2 m_2 + d_3 m_1 + d_1 m_1 m_2}{p(p - m_1)(p - m_2)} \quad (14)$$

Путем приравнивания множителей при одинаковых степенях p в числителях слева и справа в соотношении (14) получим систему уравнений

$$d_1 + d_2 + d_3 = \vartheta a'; \quad (15a)$$

$$-d_1 m_2 - d_1 m_1 - d_2 m_2 - d_3 m_1 = \vartheta b'; \quad (15b)$$

$$d_1 m_1 m_2 = \vartheta c'. \quad (15в)$$

Путем решения системы уравнений (15a – 15в) и с учетом уравнения Виета находим значения коэффициентов d_1, d_2 и d_3 , которые равны

$$d_1 = \frac{\vartheta c'}{m_1 m_2} = \frac{\vartheta c'}{c'};$$

$$d_2 = \frac{\vartheta b' - d_1 n' + m_1(\vartheta a' + d_1)}{n'};$$

$$d_3 = \vartheta a' - d_1 - d_2.$$

Уравнение (13) при переходе в область оригиналов [5, 6] принимает следующий вид

$$i t = d_1 + d_2 \exp m_1 t + d_3 \exp m_2 t \quad (16)$$

На рис. 3 представлен график зависимости тока заряжения межфазной границы инертный электрод – твердый электролит, построенный в соответствии с уравнением (16) при следующих значениях удельных параметров эквивалентной электрической схемы, изображенной на рис. 1:

$$S_{эл} = 1 \text{ см}^2; \vartheta = 10 \cdot 10^{-3} \text{ В с};$$

$$C_1 = 2 \cdot 10^{-6} \text{ Ф см}^2; C_2 = 40 \cdot 10^{-6} \text{ Ф см}^2;$$

$$C_{r2} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ Ф см}^2; C_3 = 2 \cdot 10^{-6} \text{ Ф см}^2;$$

$$C_{r3} = 5 \cdot 10^{-6} \text{ Ф см}^2;$$

$$R_2 = 80 \text{ Ом} \cdot \text{см}^2; R_{r2} = 200 \text{ Ом} \cdot \text{см}^2;$$

$$R_3 = 200 \text{ Ом} \cdot \text{см}^2; R_{r3} = 300 \text{ Ом} \cdot \text{см}^2;$$

$$d_1 = 0,42285 \cdot 10^{-7} \text{ А см}^2;$$

$$d_2 = 0,335 \cdot 10^{-7} \text{ А см}^2;$$

$$d_3 = 0,1122 \cdot 10^{-7} \text{ А см}^2;$$

$$m_1 = -14,0265 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}; m_2 = -0,9805 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}.$$

Для определения временного интервала пригодности уравнения (16) необходимо предварительно вычислить постоянную времени функционирования RC-ячейки в связи с изменением параметров эквивалентной электрической схемы (рис. 1). В соответствии с изменившимися параметрами эквивалентной электрической схемы постоянная ячейки может быть определена как $t = R_{\text{общ}} \cdot C_{\text{общ}} = 759 \text{ мкс}$, где $R_{\text{общ}} = 179,5 \text{ Ом}$ – суммарное сопротивление ячейки, а $C_{\text{общ}} = 4,23 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$ – суммарная емкость ячейки.

Уравнение (16) с учетом значений всех входящих в него параметров принимает вид

$$i(t) = 42,285 \cdot 10^{-3} - 33,50 \cdot 10^{-3} \exp(-14,0265 \cdot 10^3 t) + 11,22 \cdot 10^3 \exp(-0,9805 \cdot 10^3 t) \quad (17)$$

Уравнение (17) функционально отличается от аналогичного уравнения, полученного нами в случае замедленной диффузии и адсорбции – десорбции одного сорта частиц [1]. Если в случае замедленной диффузии и адсорбции – десорбции одного сорта частиц ток заряжения межфазной границы инертный электрод – твердый электролит в методе линейной развертки потенциала возрастает, то в случае замедленной диффузии и адсорбции – десорбции двух разных сортов частиц ток заряжения с течением времени медленно уменьшается (рис. 3).

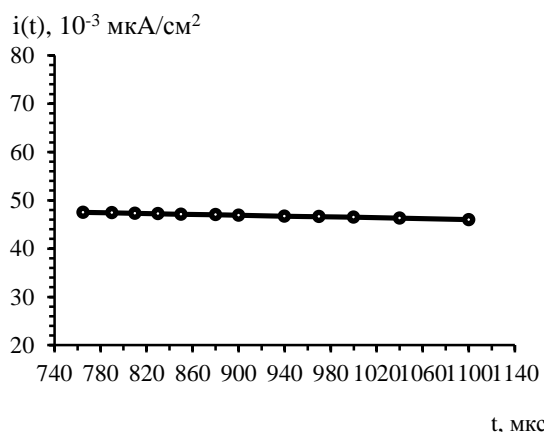


Рис. 3. Зависимость тока заряжения межфазной границы блокированный электрод – твердый электролит для области относительно «больших» времен в соответствии с диффузионной моделью Джекобсона и Веста

Fig. 3. The dependence of charging current of interface of blocked electrode-solid electrolyte for the area of relatively large time according to Jacobsen –West model

Таблица 2

Значения составляющих уравнения (17) для тока заряжения межфазной границы инертный электрод – твердый электролит в режиме линейной развертки потенциала

Table 2. The values of terms of the equation (17) for the charging current of interface of inert electrode – solid electrolyte under potential linear sweep

t, мкс	d ₁ , мкА/см ²	exp(-0.9805·10 ³ t)·d ³ , мкА/см ²	i(t), мкА/см ²
765	42,285·10 ³	5,30·10 ³	47,585·10 ³
790	42,285·10 ³	5,17·10 ³	47,455·10 ³
810	42,285·10 ³	5,07·10 ³	47,350·10 ³
830	42,285·10 ³	5,97·10 ³	47,255·10 ³
850	42,285·10 ³	5,87·10 ³	47,155·10 ³
880	42,285·10 ³	5,73·10 ³	47,015·10 ³
900	42,285·10 ³	5,64·10 ³	46,925·10 ³
940	42,285·10 ³	5,47·10 ³	46,755·10 ³
970	42,285·10 ³	5,33·10 ³	46,615·10 ³
1000	42,285·10 ³	5,21·10 ³	46,495·10 ³
1040	42,285·10 ³	5,04·10 ³	46,325·10 ³
1100	42,285·10 ³	5,81·10 ³	46,095·10 ³

Значения предпоследнего члена в соотношении (17) при временах, равных 765 мкс и выше, существенно меньше остальных, поэтому ими можно пренебречь.

ВЫВОДЫ

В настоящей работе анализ кинетики процесса заряжения межфазной границы блокированный электрод – твердый электролит проведен в режимах линейной развертки тока и потенциала для области относительно «больших» времен, когда справедливо применение диффузионной модели Джекобсона и Веста.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гусейнов Р.М., Раджабов Р.А. // Электрохимия. 2013. Т. 49. № 10. С. 1053-1059; Guseynov R.M., Radzhabov R.A. // Elektrokhimiya. 2013. V. 49. N 10. P. 1053-1059 (in Russian).
2. Укше Е.А., Букун Н.Г. Твердые электролиты. М.: Наука. 1977. 176 с.; Ukshe E.A., Bukun N.G. Solid electrolytes. M.: Nauka. 1977. 176 p. (in Russian).
3. Трейер В.В. Электрохимические приборы. М.: Советское радио. 1978. 88 с.; Treiyer V.V. Electrochemical instruments. M.: Sovetskoe radio, 1978. 88 p. (in Russian).
4. Выгодский М.Я. Справочник по элементарной математике. М.: Наука. 1986. 317 с.; Vygodskiy M.Ya. Handbook on elementary mathematics. M.: Nauka. 1986. 317 p. (in Russian).
5. Деч Г. Руководство к практическому применению преобразования Лапласа. М.: Наука. 1965. 287 с.; Dech G. Guide for practical application of Laplace transformation. M.: Nauka. 1965. 287 p. (in Russian).
6. Справочник по специальным функциям. / Под ред. Абрамовица М., Стиган И. М.: Наука. 1979. С. 809-810; Handbook on special functions. Ed. M. Abramovits, I. Stigan. M.: Nauka. 1979. P. 809-810 (in Russian).
7. Гусейнов Р.М., Махмудов Х.М., Раджабов Р.А., Бахмудкадиева З.Н., Зайнутдинова З.А. // Изв. ДГПУ. 2015. № 2. С. 19 – 25; Guseynov R.M., Makhmudov Kh.M., Radzhabov R.A., Bakhmudkadiyeva Z.N., Zaiynutdinova Z.A. // Izv. DGPU. 2015. N 2. P. 19 – 25 (in Russian).