

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ЯЧЕЙКИ С ГРАНИЦЕЙ ОБРАТИМЫЙ ЭЛЕКТРОД – ТВЕРДЫЙ ЭЛЕКТРОЛИТ ИЛИ ИОННЫЙ РАСПЛАВ МЕТОДАМИ ЛИНЕЙНОЙ РАЗВЕРТКИ ПОТЕНЦИАЛА И ТОКА

Р.М. Гусейнов, Р.А. Раджабов, Х.М. Махмудов, Р.К. Келбиханов

Ризван Меджидович Гусейнов

Кафедра химии, Дагестанский государственный педагогический университет, ул. М. Ярагского, 57, Махачкала, Республика Дагестан, Российская Федерация, 367003

E-mail: rizvanguseynov@mail.ru

Раджаб Абдулганиевич Раджабов

Кафедра информационных технологий, Дагестанский государственный педагогический университет, ул. М. Ярагского, 57, Махачкала, Республика Дагестан, Российская Федерация, 367003

E-mail: radzhab67@mail.ru

Хейрулла Магомедович Махмудов

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

Руслан Келбиханович Келбиханов

Кафедра общей, экспериментальной физики и методики ее преподавания, Дагестанский государственный педагогический университет, ул. М. Ярагского, 57, Махачкала, Республика Дагестан, Российская Федерация, 367003

*Целью настоящего исследования являлось изучение кинетики двух параллельно идущих процессов: заряжения двойного электрического слоя и переноса заряда на межфазной границе обратимый серебряный электрод – сульфатный твердый электролит или соответствующий ему ионный расплав в двух режимах функционирования электрохимической ячейки – гальванодинамическом и потенциодинамическом. Исследование электрохимической кинетики производилось методом операционного импеданса, основанного на законе Ома о взаимодействии между преобразованными по Лапласу значениями тока, напряжения и комплексного сопротивления (импеданса). Путем соответствующих математических выкладок получены аналитические выражения зависимости тока, проходящего через ячейку, в методе линейной развертки потенциала (потенциодинамическом режиме), ее функционирования от времени и выражение потенциала межфазной границы в зависимости от времени в гальванодинамическом режиме (в методе линейной развертки тока). Зависимость потенциала межфазной границы электрод – твердый электролит или ионный расплав от времени подчиняется экспоненциальной (или показательной) функции в гальванодинамическом режиме функционирования ячейки, а зависимость тока через ячейку от времени подчиняется линейной зависимости в потенциодинамическом режиме функционирования ячейки. Проведенный нами анализ и сравнение результатов двух независимых электрохимических методов показало, что поведение электрохимических ячеек, включающих в себя обратимый металлический электрод – твердый электролит или соответствующий ему ионный расплав, подчиняется классической эквивалентной электрической схеме Эршлера – Рэндлса. Данное утверждение можно доказать не только методом переменного тока (импедансным методом), но и релаксационными методами – гальванодинамическим и потенциодинамическим (то есть методами линейной развертки потенциала и тока).*

**Ключевые слова:** схема Эршлера – Рэндлса, ионный расплав, твердый электролит, обратимый электрод, двойной электрический слой

## INVESTIGATION OF ELECTROCHEMICAL CELL WITH REVERSIBLE ELECTRODE – SOLID ELECTROLYTE OR IONIC MELT INTERFACE BY LINEAR CURRENT AND LINEAR POTENTIAL SCANNING METHODS

R.M. Guseynov, R.A. Radzhabov, Kh.M. Makhmudov, R.K. Kelbikhanov

Rizvan M. Guseynov

Chemistry Department, Dagestan State Pedagogical University, Yaragskogo st., 57, Makhachkala, Republic of Dagestan, 367003, Russia

E-mail: rizvanguseynov@mail.ru

Radzhab A. Radzhabov

Department of Information Technology, Dagestan State Pedagogical University, Yaragskogo st., 57, Makhachkala, Republic of Dagestan, 367003, Russia

E-mail: radzhab67@mail.ru

Kheirulla M. Makhmudov

Department of Theoretical Bases and Technology of Elementary Mathematical Education, Dagestan State Pedagogical University, Yaragskogo st., 57, Makhachkala, Republic of Dagestan, 367003, Russia

Ruslan K. Kelbikhanov

The Department of General, Experimental Physics and its Teaching Methods, the faculty of Physics, Dagestan State Pedagogical University, Yaragskogo st., 57, Makhachkala, 367003, Russia

*The main purpose of this article is a study of the kinetics of two simultaneous processes: the charging of the electric double layer and discharge-ionization on the reversible silver electrode – sulfate solid electrolyte interface and its melt in two regimes: galvanodynamical and potentiodynamical. The investigation of the electrochemical kinetics was performed by operational impedance method which is based on the Laplas transformation and Ohm's law between current, voltage and complex resistance (impedance). By corresponding mathematical computations the analytical expression of time dependence of current which passes through electrochemical cell in potentiodynamical mode were received. The analytical expression of interface potential – time dependence in galvanodynamical regime (mode) was obtained also. The electrode – solid electrolyte or its ionic melt interface potential – time dependence in galvanodynamical regime is described by exponential function. The time dependence of the current which passes through electrochemical cell in potentiodynamical regime is described by linear function. The comparative analysis of a results of two independent methods showed that for the investigation of the electrochemical systems contained the reversible metallic electrode – solid electrolyte and ionic melt interface may be used not only alternate current methods but relaxation methods also (for instance, Galvanodynamic and Potentiodynamic methods).*

**Key words:** Ershler-Randls scheme, ionic melt, solid electrolyte, reversible electrode, double electric layer

### Для цитирования:

Гусейнов Р.М., Раджабов Р.А., Махмудов Х.М., Келбиханов Р.К. Исследование электрохимической ячейки с границей обратимый электрод – твердый электролит или ионный расплав методами линейной развертки потенциала и тока. *Иzv. вузов. Химия и хим. технология.* 2018. Т. 61. Вып. 4-5. С. 57–63

### For citation:

Guseynov R.M., Radzhabov R.A., Makhmudov Kh.M., Kelbikhanov R.K. Investigation of electrochemical cell with reversible electrode – solid electrolyte or ionic melt interface by linear current and linear potential scanning methods. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2018. V. 61. N 4-5. P. 57–63

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящем исследовании для изучения кинетики электродных процессов нами применяется метод операционного импеданса, который нами применялся и раньше в работах [1-11].

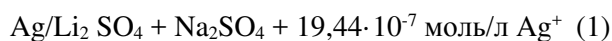
По утверждению В.М. Бякова и др. [12], работы Б.В. Эршлера являются основой разработки и решения всех принципиальных проблем электрохимии XX века. Протекающий на электродах фарадеевский процесс переноса заряда и вещества через межфазную границу электрод – электролит в отсутствие заметной адсорбции электрохимически

активных веществ, как известно [13], моделируется схемой Эршлера – Рэндлса.

Большинство научных работ по исследованию кинетики электродных процессов в твердых электролитах и в ионных расплавах, поведение которых описывается классической эквивалентной электрической схемой Эршлера – Рэндлса, проведено методом переменноточного импеданса [14-16].

Что касается импульсных релаксационных методов исследования кинетики электродных процессов, описываемых с помощью схемы Эршлера – Рэндлса, то таких попыток в научной литературе по твердым электролитам и расплавленным ионным расплавам встречается не так много. Для устранения отмеченного пробела, а также с целью расширения арсенала электрохимических методов исследования кинетики электродных процессов в твердых электролитах и ионных расплавах в настоящей работе нами предпринимается попытка исследования кинетического поведения обратимого металлического электрода в сульфатных твердых электролитах и в соответствующих им ионных расплавах. Как нами было показано ранее [14,15], поведение такой системы подчиняется классической схеме Эршлера – Рэндлса.

В качестве примера обратимого металлического электрода можно указать на обратимый серебряный электрод в твердых электролитах  $0,8\text{Li}_2\text{SO}_4 \cdot 0,2\text{Na}_2\text{SO}_4$  и  $\text{Li}_2\text{SO}_4 \cdot \text{Na}_2\text{SO}_4$  и в соответствующих им расплавах с небольшими добавками сульфата серебра, который можно представить в виде [15,16]:



В работах [14,15] поведение электрохимической системы (1) было исследовано методом переменноточного импеданса, и было показано, что оно подчиняется классической эквивалентной схеме Эршлера – Рэндлса, приведенной на рис. 1.

В работе [17] анализируется электрохимическое поведение схемы Эршлера – Рэндлса на примере системы (1) в хроноамперометрическом (импульсном потенциостатическом) и хронопотенциометрическом (импульсном гальваностатическом) режимах.

В настоящей же работе мы попытаемся анализировать электрохимическое поведение схемы Эршлера – Рэндлса на примере системы (1) в потенциодинамическом (метод линейной развертки потенциала) и гальванодинамическом (метод линейной развертки тока) режимах функционирования системы.

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

### 1. Потенциодинамический режим

Эквивалентная электрическая схема Эршлера – Рэндлса представлена на рис. 1, где  $R_F$  – омическое сопротивление, характеризующее реакцию разряда-ионизации серебра через межфазную границу электрод – твердый электролит или ионный расплав;  $Z_{W_2}$  – импеданс Варбурга, связанный с диффузией ионов серебра;  $C_1$  – емкость двойного электрического слоя (ДЭС).

Операционный импеданс (т.е. преобразованный по Лапласу импеданс) конденсатора  $C_1$  равен  $Z(p) = \frac{1}{pC_1}$ , а операционный импеданс омического сопротивления  $R_F$  и диффузионного импеданса Варбурга равен:

$$Z(p) = R_F + \frac{W_2}{\sqrt{p}}, \quad (1)$$

где  $p$  – комплексная переменная). Суммарный операционный импеданс двух параллельных цепочек  $Z(p)$  можно вычислить по правилам сложения импедансов двух параллельных участков из соотношения (2):

$$z(p) = \frac{R_F \sqrt{p} + W_2}{pC_1 R_F \sqrt{p} + pC_1 W_2 + \sqrt{p}}, \quad (2)$$

где  $W_2$  – диффузионная постоянная Варбурга.

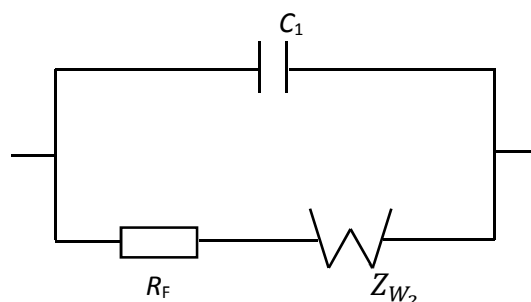


Рис. 1. Эквивалентная схема Эршлера – Рэндлса  
Fig.1. The equivalent circuit (diagram) of Ershler-Rendls

В потенциодинамическом (методом линейной развертки потенциала) режиме  $E(t) = E_0 + \vartheta t$  (где  $E_0$  – первоначальное значение потенциала, а  $\vartheta$  – линейная скорость развертки потенциала), при  $E = 0$  изображение по Лапласу от функции  $E(t)$  равен  $E(p) = \vartheta/p^2$ . Но поскольку  $I(p) = E(p)/Z(p)$ , то подставляя в последнее соотношение значения  $E(p)$  и  $Z(p)$ , получаем

$$i(p) = \frac{\vartheta(ap\sqrt{p} + bp + k\sqrt{p})}{p^2(\sqrt{p} + n)} \quad (3)$$

В выражение (3) введены следующие обозначения:

$$a = C_1; b = C_1 W_2 / R_F; k = 1/R_F; n = W_2 / R_F.$$

Выражение (3), как дробно-рациональное, может быть разложено на сумму простейших дробей

$$i(p) = \frac{\vartheta(ap\sqrt{p}+bp+k\sqrt{p})}{p^2(\sqrt{p}+n)} = \frac{d_1}{p^2} + \frac{d_2}{p} + \frac{d_3}{\sqrt{p}} + \frac{d_4}{\sqrt{p}+n} \quad (4)$$

Для вычисления пока неизвестных коэффициентов  $d_1, d_2, d_3$  и  $d_4$  приведем соотношение (4) к виду

$$i(p) = \frac{\vartheta(ap\sqrt{p} + bp + k\sqrt{p})}{p^2(\sqrt{p} + n)} = \frac{d_1(\sqrt{p}+n)+d_2p(\sqrt{p}+n)+d_3p\sqrt{p}(\sqrt{p}+n)+d_4p^2}{p^2(\sqrt{p}+n)} \quad (5)$$

Путем приравнивания коэффициентов при одинаковых степенях  $p$  в выражении (5) слева и справа получим четыре следующих уравнения

$$\left. \begin{aligned} d_3 + d_4 &= 0 \\ d_2 + d_3n &= \vartheta a \\ d_2n + d_4 &= \vartheta b \\ d_1 &= \vartheta k \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Из системы уравнений (6) найдем значения коэффициентов  $d_1, d_2, d_3$  и  $d_4$  в виде

$$\begin{aligned} d_1 &= \vartheta k; \\ d_2 &= \vartheta b/n; \\ d_3 &= (\vartheta a - d_2)/n; \\ d_4 &= -d_3. \end{aligned}$$

С помощью таблиц обратного преобразования Лапласа [18] можно выполнить почленный переход соотношения (4) в пространство оригиналов, в результате чего получим следующее выражение для тока, протекающего через ячейку (1)

$$i(t) = d_1 t + d_2 + (d_3 + d_4) \frac{1}{\sqrt{\pi t}} - d_4 n \exp(n^2 t) \operatorname{erfc}(nt^{1/2}) \quad (7)$$

Для вычисления параметров в выражении (7) воспользуемся данными величин эквивалентной электрической схемы Эршлера – Рэндлса для системы (1), полученными методом переменного тока в работе [19]:  $W_2 = 6,87 \text{ Ом} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{с}^{-1/2}$ ,  $R_F = 0,0125 \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ ,  $C_1 = 164,02 \cdot 10^{-6} \text{ Ф/см}^2$ ,  $\vartheta = 10 \cdot 10^{-6} \text{ В/с}$ .

При  $n = 549,6$  член, содержащий  $\exp(n^2 t) \operatorname{erfc}(nt^{1/2})$  в выражении (7), превращается в нуль, и выражение для тока с учетом соотношения  $d_3 + d_4 = 0$  принимает простейший вид

$$i(t) = \vartheta C_1 + \vartheta t/R_F \quad (8)$$

На рис. 2 представлена зависимость тока, проходящего через ячейку (1), от времени, построенная в соответствии с уравнением (8) при указанных выше значениях параметров  $W_2, R_F, C_1$  и  $\vartheta$ .

Как следует из уравнения (8), и как видно из рис. 2, зависимость тока, проходящего через ячейку в случае выполнения эквивалентной электрической схемы Эршлера – Рэндлса, от времени является прямолинейной функцией.

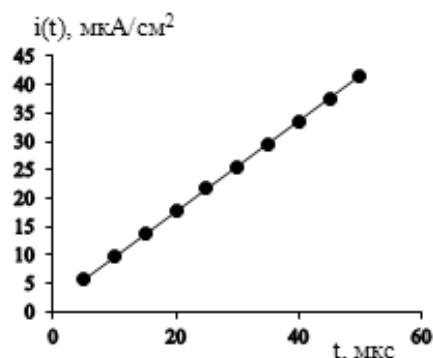


Рис. 2. Зависимость тока, проходящего через ячейку (1), от времени  $t$  в потенциодинамическом режиме функционирования Fig.2. The plot of the current density – time dependence, which is constructed in according to equation (8) in the potentiodynamic regime of operation of the cell (1)

Из тангенса угла наклона прямой на рис. 2 можно определить значение сопротивления переноса заряда через межфазную границу  $R_F$ , а из величины отсечки прямой на оси токов можно вычислить значение емкости двойного электрического слоя на межфазной границе  $C_1$ .

### 2. Гальванодинамический режим

В гальванодинамическом режиме (в методе линейной развертки тока)  $I(t) = I_0 + \vartheta t$  (где  $I_0$  – первоначальное значение тока, а  $\vartheta$  – скорость линейной развертки тока) при условии  $I = 0$  оператор Лапласа от функции  $I(t)$  равен  $I(p) = \vartheta/p^2$ . Поскольку  $E(p) = I(p) \cdot Z(p)$ , то для операторного потенциала получим соотношение

$$\varphi(p) = \frac{\vartheta}{p^2\sqrt{p}} \left( \frac{R_F\sqrt{p}+W_2}{ap+b\sqrt{p}+1} \right) = \frac{\vartheta}{p^2\sqrt{p}} \left( \frac{r'\sqrt{p}+l'}{p+b'\sqrt{p}+k'} \right) \quad (9)$$

В выражении (9) введены обозначения:  $a = C_1 R_F$ ;  $b = C_1 W_2$ ;  $b' = b/a$ ;  $k' = 1/a$ ;  $r' = R_F/a$ ;  $l' = W_2/a$ .

Выражение (9), как дробно-рациональное, может быть разложено на сумму простейших дробей

$$\varphi(p) = \frac{\vartheta}{p^2\sqrt{p}} \left( \frac{r'\sqrt{p}+l'}{p+b'\sqrt{p}+k'} \right) = \frac{d_1}{p^2} + \frac{d_2}{p} + \frac{d_3}{\sqrt{p}} + \frac{d_4}{\sqrt{p}+m_1} + \frac{d_5}{\sqrt{p}+m_2} \quad (10)$$

где  $m_1$  и  $m_2$  – корни (нули) характеристического квадратного уравнения

$$p + b'\sqrt{p} + k' = 0, \text{ равные: } m_1 = -245,873; m_2 = -1983,726.$$

Значения корней квадратного уравнения найдены при следующих значениях параметров эквивалентной электрической схемы:  $W_2 = 27,87 \text{ Ом} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{с}^{-1/2}$ ;  $R_F = 0,0125 \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ ;  $C_1 = 164,02 \cdot 10^{-6} \text{ Ф/см}^2$ .

Из соотношения (10) описанным выше в разделе 1 способом получим следующую систему из 6 уравнений:

$$\left. \begin{aligned} d_3 + d_4 + d_5 &= 0 \\ d_3(m_1 + m_2) + d_5m_1 + d_4m_2 + d_2 &= 0 \\ d_3m_1m_2 + d_2(m_1 + m_2) &= 0 \\ d_1 + d_2m_1m_2 &= 0 \\ d_1(m_1 + m_2) &= 0 \\ d_2m_1m_2 &= \vartheta r \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Из системы уравнений (11) найдем значения коэффициентов  $d_1, d_2, d_3, d_4$  и  $d_5$ , которые равны:

$$\left. \begin{aligned} d_1 &= \vartheta r' / m_1 m_2 \\ d_2 &= -d_1 / m_1 m_2 \\ d_3 &= -d_2(m_1 + m_2) / m_1 m_2 \\ d_4 &= (-d_2 - d_3 m_2) / (m_2 - m_1) \\ d_5 &= -d_3 - d_4 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Численные значения этих коэффициентов, вычисленные при указанных выше значениях параметров эквивалентной электрической схемы, равны:

$$\begin{aligned} d_1 &= 1,25 \cdot 10^{-7} \text{ В/с}; d_2 = -0,2563 \cdot 10^{-12}; \\ d_3 &= 0,0117 \cdot 10^{-13}; d_4 = -0,00148 \cdot 10^{-12}; \\ d_5 &= 0,0031 \cdot 10^{-13}. \end{aligned}$$

С помощью таблиц обратного преобразования Лапласа и с учетом системы уравнений (11) и (12) для потенциала межфазной границы электрод – твердый электролит или ионный расплав получим следующее соотношение: (13)

$$\begin{aligned} \varphi(t) &= 1,25 \cdot 10^{-7} t - 0,25628 \cdot 10^{-12} - \\ &- 0,000365 \cdot 10^{-9} \exp(60453,53t) \operatorname{erfc}(-245,873t^{1/2}) + \\ &+ 0,0006213 \cdot 10^{-8} \exp(3935168,843t) \operatorname{erfc}(-1983,726t^{1/2}) \end{aligned}$$

На рис.3 представлен график зависимости потенциала межфазной границы от времени, построенный в соответствии с соотношением (13).

Как видно из графика на рис. 3, зависимость потенциала межфазной границы от времени

имеет экспоненциальный характер и поэтому очень резко возрастает с течением времени.

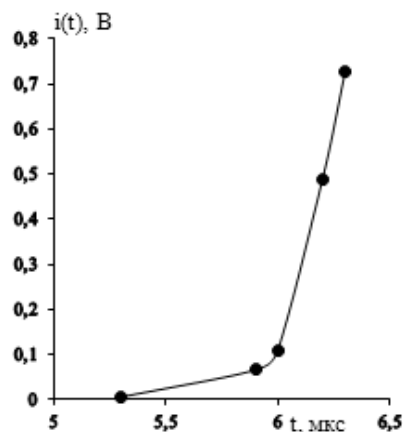


Рис. 3. Зависимость потенциала межфазной границы от времени функционирования ячейки (1) в гальванодинамическом режиме

Fig.3.The dependence of the potential of the interface on operation time of the cell (1) in the galvanodynamic regime

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение необходимо отметить, что определенную информацию о поведении обратимых металлических электродов в твердых электролитах или в соответствующих им ионных расплавах можно получить не только классическим импедансным методом [14-16], но и другими релаксационными методами, такими как хроноамперометрическим и хронопотенциометрическим [17], а также методами линейной развертки тока и линейной развертки потенциала (потенциодинамическим и гальванодинамическим).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гусейнов Р.М., Махмудов Х.М., Раджабов Р.А., Зайнутдинова З.А., Келбиханов Р.К. Классическая схема Эршлера-Рэндлса в хроноамперометрическом (импульсном потенциостатическом) режиме функционирования. *Изв. Дагестан. гос. педагог. ун-та. Естеств. и точн. науки.* 2017. Т. 11. № 1. С. 17-20.
2. Гусейнов Р.М., Махмудов Х.М., Раджабов Р.А., Бахмудкадиева З.Н., Зайнутдинова З.А. Поведение границы блокированный (инертный) электрод-твердый электролит в гальваногармоническом режиме заряжения. Случай замедленной диффузии и адсорбции-десорбции двух разных сортов частиц. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2016. Т. 59. Вып. 3. С. 59- 64.
3. Гусейнов Р.М., Махмудов Х.М., Раджабов Р.А., Бахмудкадиева З.Н., Зайнутдинова З.А. Граница блокированный электрод –твердый электролит в хроноамперо- и хронопотенциометрических режимах заряжения. *Украин. хим. журн.* 2015. Т. 81. № 9. С. 47- 52.

#### REFERENCES

1. Guseynov R.M., Makhmudov K.M., Radzhabov R.A., Zaynutdinova Z.A., Kelbikhanov R.K. The Classical Ershler-Randls Scheme in the Chronoamperimetric (Pulsed Potentiostatic) Mode of Functioning. *Izv. Dagestan. Gos. Pedagog. Un-ta. Estestv. i Tochn. Nauki.* 2017. V. 11. N 1. P. 17-20 (in Russian).
2. Guseynov R.M., Makhmudov H.M., Radzhabov R.A., Bakhmudkadiyeva Z.N., Zainutdinova Z.A. Behavior of blocking (inert) Electrode/ Solid Electrolyte Interface in Galvanogarmonic Mode. Case of deaccelerated Diffusion and adsorption-Desorption of two Different Kinds of Particles. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2016. V. 59. N 3. P. 59-64 (in Russian).
3. Guseynov R.M., Makhmudov K.M., Radzhabov R.A., Bakhmudksdiyeva Z.N., Zaynutdinova Z.A. The blocking Electrode- Solid Electrolyte Interface in the Chronoampero – and Chronopotentiometric regimes of Charging. *Ukrain. Khim. Zhurn.* 2015. V. 81. N 9. P. 47-52 (in Russian).

4. **Гусейнов Р.М., Раджабов Р.А.** Поведение границы блокированный электрод – твердый электролит в гальваногармоническом режиме заряжения. *Электрохимия*. 2015. Т. 51. № 4. С. 378 – 384.
5. **Гусейнов Р.М., Гаджиев С.М., Раджабов Р.А.** Твердые электролиты. Термодинамические, активационные и электрохимические аспекты. Саарбрюккен (Германия): Международ. науч. изд-во «Palmarium Academic Publishing». 2014. 124 с.
6. **Гусейнов Р.М., Раджабов Р.А., Бахмудкадиева З.Н.** Граница блокированный электрод – твердый электролит в различных режимах. Электрохимические аспекты. Саарбрюккен (Германия): Международ. науч. изд-во «Palmarium Academic Publishing». 2016. 142 с.
7. **Гусейнов Р.М., Раджабов Р.А.** Кинетика формирования двойного электрического слоя на границе блокированный сферический или цилиндрический электрод – твердый электролит в гальванодинамическом и потенциодинамическом режимах. *Иzv. Дагестан. гос. педагог. ун-та. Естеств. и точн. науки*. 2011. № 4. С. 19-22.
8. **Гусейнов Р.М., Махмудов Х.М., Раджабов Р.А., Бахмудкадиева З.Н., Зайнутдинова З.А.** Кинетика заряжения границы блокированный электрод-твердый электролит в гальванодинамическом и потенциодинамическом режимах. Случай замедленной диффузии и адсорбции-десорбции двух разных сортов частиц. *Иzv. Дагестан. гос. педагог. ун-та. Естеств. и точн. науки*. 2015. № 4 (33). С. 15-20.
9. **Гусейнов Р.М., Махмудов Х.М., Раджабов Р.А., Бахмудкадиева З.Н., Зайнутдинова З.А., Салпагарова З.И.** Поведение границы блокированный электрод – твердый электролит в гальваногармоническом режиме заряжения. Случай замедленной диффузии и адсорбции-десорбции двух разных сортов частиц. *Иzv. Дагестан. гос. педагог. ун-та. Естеств. и точн. науки*. 2015. № 3 (32). С. 20-26.
10. **Гусейнов Р.М., Раджабов Р.А.** Граница блокированный (инертный) электрод – твердый электролит в хроноамперометрическом и хронопотенциометрическом режимах заряжения. Сборн. труд. 10-й Международной конференции (научный журнал) «Новости передовой науки - 2014». 17-25 май 2014 г. Т. 28 «Химия и химическая технология. Физика». София, Белград: Изд-во «Бял ГРАД-БГ» ООД. 2014. P.3-15.
11. **Гусейнов Р.М., Раджабов Р.А.** Blocked (Inert) Electrode – Solid Electrolyte Interface in Chronoamperometric and Chronopotentiometric Charging Modes. *Rus. J. Electrochem.* 2015. V. 51. № 4. P. 318-324.
12. **Бяков В.М.** Б. В. Эршлер. *Электрохимия*. 2009. Т. 45. № 1. С. 4-12.
13. **Дамаскин Б.Б.** Принципы современных методов изучения электрохимических реакций. М.: Изд-во МГУ. 1965. С. 102.
14. **Уксхе Е.А., Букун Н.Г.** Твердые электролиты. М.: Наука. 1977. 176 с.
15. **Гусейнов Р.М., Леонова Л.С., Уксхе Е.А.** Электрохимическое поведение системы  $Ag/Ag_2SO_4$  в твердом электролите  $0,8Li_2SO_4 \cdot 0,2Na_2SO_4$ . *Электрохимия*. 1975. Т. 11. № 10. С. 1594-1597.
4. **Guseynov R.M., Radzhabov R.A.** The Behavior of Blocked Electrode – Solid Electrolyte Interface in Galvanogharmonic Charging Mode. *Rus. J. Electrochem.* 2015. V. 51. N 4. P. 325-331.
5. **Guseynov R.M., Gadzhiev S.M., Radzhabov R.A.** Solid Electrolytes. Deutschland, Saarbrucken: “Palmarium Academic Publishing”. 2014. 124 p.
6. **Guseynov R.M., Radzhabov R.A., Bakhmudkadiyeva Z.N.** Blocking Electrode- Solid Electrolyte Interface in the Different Regimes. Deutschland, Saarbrucken: “Palmarium Academic Publisging”. 2016. 142 p.
7. **Guseynov R.M., Radzhabov R.A.** The kinetics of the process of Charging the blocked Electrode- Solid Electrolyte Interface in the case of spherical or cylindrical electrode in two modes- potentiodynamic and galvanodynamic. *Izv. Dagestan. Gos. Pedagog. Un-ta. Estestv. i Tochn. Nauki*. 2011. N 4. P. 19-22 (in Russian).
8. **Guseynov R.M., Makhmudov K.M., Radzhabov R.A., Bakhmudkadiyeva Z.N., Zaynutdinova Z.A.** The Kinetics of Charging the Blocked Electrode- Solid Electrolyte Boundary in the Galvanodynamic and Potentiodynamic Modes. The Case of The Delay Diffuzion and Adsorption-Desorption of two Different Kinds of Particles. *Izv. Dagestan. Gos. Pedagog. Un-ta. Estestv. i Tochn. Nauki*. 2015. N 4 (33). P. 15-20 (in Russian).
9. **Guseynov R.M., Makhmudov K.M., Radzhabov R.A., Bakhmudkadiyeva Z.N., Zaynutdinova Z.A., Salpagarova Z.I.** Behavior of blocking (inert) electrode- Solid Electrolyte interface in galvanogharmonic charging mode. Case of decelerated diffusion and adsorption-desorption of two different kinds of particles. *Izv. Dagestan. Gos. Pedagog. Un-ta. Estestv. i Tochn. Nauki*. 2015. N 3(32). P. 20-26 (in Russian).
10. **Guseynov R.M., Radzhabov R.A.** The blocking (inert) electrode – Solid Electrolyte Interface in the Chronoamperometric and Chrono potentiometric regimes of Charging. Materials of X Internat. Sci. Pract. Conf. «News of modern scievce – 2014». 17-25 may 2014.V. 28. Chem. And Chem. Technol. Phys. Sofia, Belgrad: izd-vo “Byalgrad-BG” OOD. 2014. 3-15 с.
11. **Guseynov R.M., Radzhabov R.A.** Blocking (inert) Electrode – Solid Electrolyte Interface in the Chronoamperometric and Chronopotentiometric Charging Modes. *Rus. J. Electrochem.* 2015. V. 51. N 4. P. 318-324.
12. **Byakov V.M.** Boris Vulfovich (Vladimirovich) Ershler. *Elektrokhimiya*. 2009. V. 45. N 1. P. 4-12 (in Russian).
13. **Damaskin B.B.** Principles of the advanced methods of study of the electrochemical reactions. M.: MGU. 1965. P.102 (in Russian).
14. **Ukshe E.A., Bukun N.G.** Solid Electrolyters. M.: Nauka. 1977. 176 p. (in Russian).
15. **Guseynov R.M., Leonova L.S., Ukshe E.A.** The Electrochemical Behavior of the System  $Ag/Ag_2SO_4$  in the Solid Electrolyte  $0,8Li_2SO_4 \cdot 0,2Na_2SO_4$ . *Elektrokhimiya*. 1975. V. 11. N 10. P. 1594-1597 (in Russian).
16. **Murigin I.V.** The electrode processes in solid electrolytes. M.: Nauka. 1991. 351 p. (in Russian).
17. **Guseynov R.M., Radzhabov R.A., Medzhidova E.A., Nadirova R.Y.** The electrochemical cell with the reversible

16. **Мурыгин И.В.** Электродные процессы в твердых электролитах. М.: Наука. 1991. 351 с.
17. **Гусейнов Р.М., Раджабов Р.А., Меджидова Э.А., Надирова Р.Я.** Электрохимическая ячейка с границей обратимый электрод – твердый электролит или ионный расплав в гальванодинамическом и потенциодинамическом режимах функционирования. *Ж. Расплавы*. 2017. № 3. С. 1-7.
18. Справочник по специальным функциям. Под ред. М. Абрамовица и И. Стигана. М.: Наука. 1979. 830 с.
19. **Гусейнов Р.М.** Электродные процессы в сульфатных твердых электролитах. Дис. ... к.х.н. Черноголовка: ИНХП АН СССР. 1976. 199 с.
- electrode – solid electrolyte or ionic melt Interface in galvanodynamic and potentiodynamic regims of functioning. *Rasplavy*. 2017. N 3. P. 1 – 7 (in Russian).
18. Handbook on Special Funtion. Eds. M. Abramovits and I. Stigan. M.: Nauka. 1979. 830 p. (in Russian).
19. **Guseynov R.M.** The Electrode Processes in Sulfate Solid Electrolytes. Dissertation for candidate degree on chemical sciences. Chernogolovka: INKhP of AN USSR. 1976. 199 p. (in Russian).

*Поступила в редакцию 13.09.2017*

*Принята к опубликованию 06.03.2018*

*Received 13.09.2017*

*Accepted 06.03.2018*