

УДК 621.3.014:621.357

DOI:10.17213/0136-3360-2015-1-66-71

## ИССЛЕДОВАНИЕ АНИЗОТРОПИИ ПРОВОДИМОСТИ ВНУТРЕННИХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОДОВ ЭЛЕКТРОЛИЗЕРОВ ХИМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

*В.Л. Беляев, А.А. Шалагинов*

Национальный минерально-сырьевой университет «Горный». Россия, 199106,  
г. Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, д. 2.

*Предложена методика изготовления электродов из листов стали с перфорированными отверстиями, разработанная для получения оптимизации геометрических характеристик электролизных ванн с целью снижения их внутреннего сопротивления и равномерного распределения тока в них, с применением расчета сложных электрических полей. Получено значение проводимости электролизера в зависимости от радиуса отверстий, расстояния между их центрами и толщины листа. Выполнено моделирование электродов, проведено исследование их проводимости и получены значения проводимости электролизной ванны в зависимости от изменения указанных параметров.*

**Ключевые слова:** падение напряжения, сопротивление, проводимость, контактное соединение, потенциал, электролизер, диафрагма, анизотропия, катод, лист.

**С**ЕГОДНЯ в электролизных предприятиях химической промышленности применяются электролизеры диафрагменного типа для производства хлора и каустической соды БГК-100 на номинальный ток 100 кА и БГК-50/25 на номинальные токи 50 и 25 кА [1 – 3]. Эти электролизеры представляют собой ванны, состоящие из днища, боковых стенок и крышки. При этом катодом является стальное днище, а анодом – крышка, изолированная от стенок резиновой прокладкой. Пресеченные сетки, погруженные в раствор, используются в качестве электродов, а раствор находится в ванне электролизера.

Одним из недостатков пресеченных сеток является невозможность установки их в одной плоскости. Поэтому в одних местах ванны межэлектродное расстояние увеличивается, а в других – уменьшается, что приводит к неравномерному распределению тока по поверхности электрода и к недостаточной производительности электролизера. К еще одному недостатку пресеченных сеток можно отнести анизотропию их проводимости, связанную с ориентацией ячеек.

При растекании тока в пресеченных сетках, применяемых в качестве электродов в существующих диафрагменных электролизерах, наблюдается анизотропия поперечной проводимости, обусловленная асимметричной конструкцией сетки [4, 5].

Поэтому первой поставленной задачей была оценка влияния ориентации листа, перфорированного круглыми отверстиями, на величину поперечной проводимости, т.е. определения степени анизотропии последней.

На рис. 1 изображена одна из областей перфорированного листа, расположенного между полюсами электролизера.

На рис. 1 изображена одна из областей перфорированного листа, расположенного между полюсами электролизера.

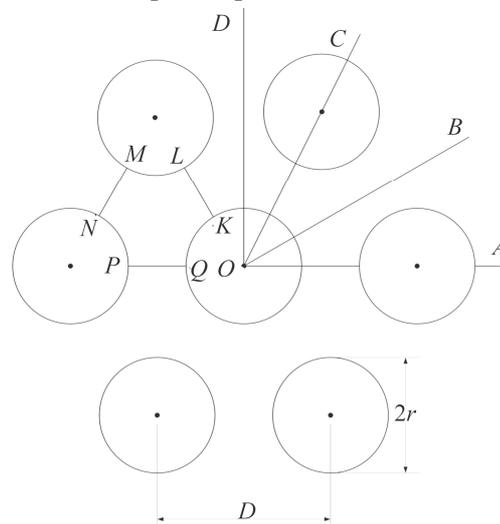
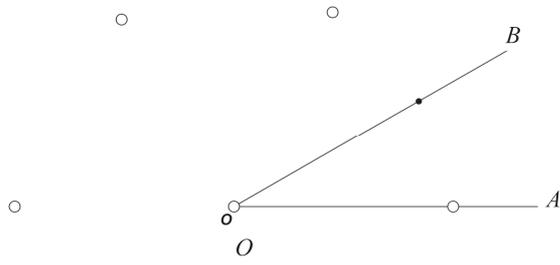
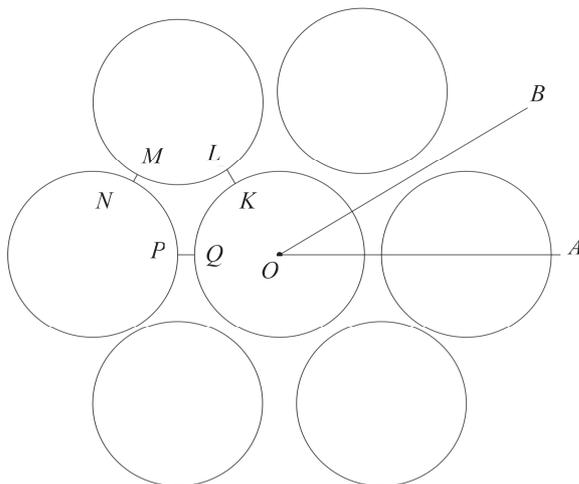


Рис. 1. Область перфорированного катодного листа диафрагменного электролизера

Видно, что благодаря симметрии поворот направления тока на  $60^\circ$  не ведет к изменению проводимости перфорированного листа. Следовательно, проводимость листа при токе, направленном параллельно оси  $OA$ , оказывается идентичной проводимости, наблюдаемой при токе, направленном параллельно оси  $OC$  вследствие симметрии отверстий перфорированного листа. Наибольшее отклонение можно ожидать у проводимости, наблюдаемой при токе, направленном параллельно оси  $OB$  или соответственно оси  $OD$ , т.е. при повороте линий тока на  $30^\circ$ . Поэтому была поставлена задача – определить степень анизотропии, т.е. относительную разность проводимостей в направлении осей  $OA$  и  $OB$ . Для этой цели рассмотрим два предельных случая. В первом случае  $\alpha = r/D = 0$ , отверстия отсутствуют. Во втором –  $\alpha = r/D = 0,5$ , отверстия максимальны (рис. 2).



a)



б)

Рис. 2. Области перфорированного катодного листа с продольными размерами отверстий: а – при  $\alpha = 0$ ; б – при  $\alpha = 0,5$

Первый предельный случай соответствует сплошному, неперфорированному листу. Поскольку удельная проводимость  $\gamma_0$  всюду одно-

родна и изотропна, то и проводимость листа окажется изотропной, следовательно, анизотропия в этом случае будет отсутствовать.

При втором предельном случае перешейки между отверстиями оказываются настолько малы, что при токе, направленном параллельно оси  $OB$ , поле в них можно считать однородным, а отрезки  $KL, MN, PQ$ , лежащие на прямых, соединяющих центры указанных отверстий, можно считать линиями равного потенциала. Тогда область листа, ограниченная дугами  $LM, NP, QK$  и отрезками  $KL, MN, PQ$ , может быть представлена звездообразной схемой замещения (рис. 3) [6].

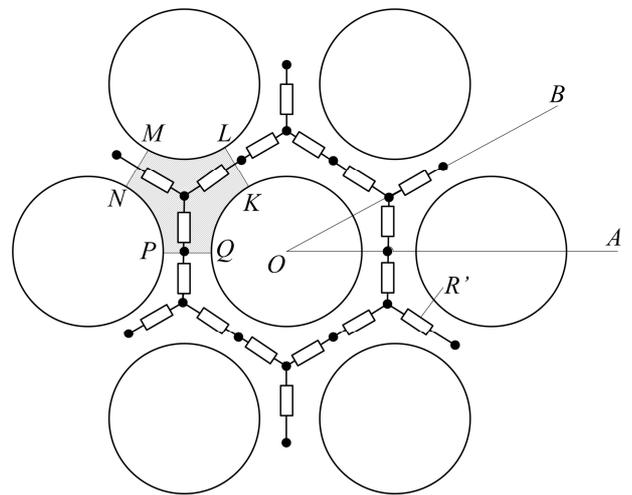


Рис. 3. Электрическая звездообразная схема замещения перфорированного катодного листа

Если известно сопротивление  $R'$  в звездообразной схеме замещения, то поперечная проводимость листа  $G_{OB}$  в направлении  $OB$  может быть определена по формуле

$$G_{OB} = \gamma_{OB} \frac{b}{l},$$

где  $l$  – длина листа в направлении  $OB$ ;  $b$  – ширина листа в направлении, перпендикулярном  $OB$ ;  $\gamma_{OB}$  – удельная эквивалентная поверхностная проводимость перфорированного листа, которая связана с сопротивлением  $R'$  элемента звездообразной схемы замещения соотношением

$$\gamma_{OB} = \frac{\sqrt{3}}{6R'} \tag{1}$$

Для того чтобы в этом убедиться, следует помнить, что сопротивление  $R_1$  области  $KLMNPQ$  при указанной ориентации листа (по направлению  $B$ ) по отношению к току превышает сопротивление  $R'$  в полтора раза:  $R_1 = 1,5 \cdot R'$ .

В самом деле, сопротивление  $R'$  включено последовательно группе сопротивлений  $R'$  и  $R'$ , которые между собою соединены параллельно:

$$R_1 = R' + \frac{R'R'}{R'+R'} = 1,5R'.$$

Покажем это иначе. Заменяя звезду эквивалентным треугольником (рис. 4), заметим, что одна из сторон может быть выключена из рассмотрения ввиду отсутствия тока в ней, поскольку концы указанной стороны имеют один и тот же потенциал в силу симметрии поля тока по направлению  $OB$ . А это позволяет считать, что две другие стороны соединены параллельно, а их сопротивление  $R_1$  равно половине сопротивления  $R''$  отдельной стороны.

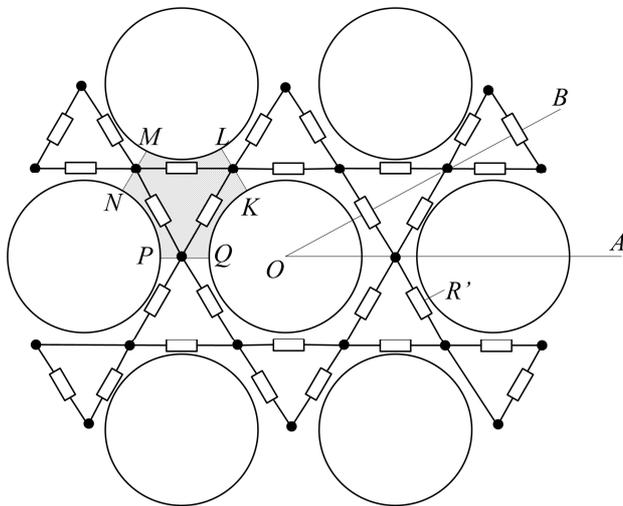


Рис. 4. Эквивалентная треугольная схема замещения перфорированного катодного листа

Учитывая все это, получим тот же результат, что был показан выше:

$$R_1 = 0,5R'' = 0,5 \cdot 3R' = 1,5R'.$$

Здесь было учтено, что при замене звезды эквивалентным треугольником имеет место известное соотношение:

$$R_{\Delta} = 3R_Y.$$

Выше были рассмотрены соотношения, позволяющие установить связь между сопротивлением  $R'$  элемента звездообразной схемы замещения и удельной эквивалентной поверхностной проводимостью перфорированного листа  $\gamma_{OB}$  при токе, ориентированном в направлении  $OB$ . Перейдем к рассмотрению поперечной проводимости и установлению связи между ее величиной и величиной сопротивления  $R_1$  для того случая, когда ток направлен параллельно оси  $OA$ . В

этом случае в схеме замещения, представленной на рис. 3, будет отсутствовать ток в элементах  $R'$  эквивалентной звезды, расположенных вертикально, а остальные элементы окажутся включенными последовательно, образуя отдельные ветви, и эквивалентная удельная поверхностная проводимость  $\gamma_{OA}$  при ориентации тока по оси  $OA$  может быть найдена по соотношению

$$\gamma_{OA} = \sqrt{3}/(6R'). \quad (2)$$

Идентичность формул (1) и (2) позволяет сделать утверждение, что при указанном допущении, а именно, в предположении эквипотенциальности линий, соединяющих центры отверстий при ориентации тока по направлению  $OB$ , эквивалентная удельная поверхностная проводимость перфорированного листа не зависит от того, как по  $OA$  или  $OB$  направлен ток, т.е. с анизотропией поперечной проводимости можно не считаться.

Полезно заметить, что при ориентации тока по направлению  $OA$  некоторые из указанных отрезков линий, соединяющих центры отверстий, например  $PQ$ , оказываются не линиями равного потенциала, а силовыми линиями, но это наблюдается в областях, где электрическое поле практически отсутствует, что на схеме замещения соответствует сопротивлениям (лучам звезды), которые обесточены. А это позволяет считать, что полученные результаты остаются в силе.

Итак, при изменении направления тока на  $60^\circ$  благодаря симметрии поверхностная проводимость не изменяется. Как было показано выше, изменение направления тока на  $30^\circ$ , переход от направления  $OA$  к направлению  $OB$  при  $\alpha \approx 0$  и  $\alpha \approx 0,5$  также не ведет к изменению удельной проводимости. Однако при изменении направления тока на  $15^\circ$  с ними можно не считаться. Все это позволяет сделать предположение, что анизотропия отсутствует и при произвольных значениях  $\alpha$  в пределах  $0 < \alpha < 0,5$ , т.е.

$$\gamma_{OA} = \gamma_{OB} = \gamma.$$

Для проверки указанного предложения, а также для определения соотношения между удельной поверхностной проводимостью  $\gamma_0$  сплошного листа и эквивалентной удельной поверхностной проводимостью  $\gamma$  перфорированного круглыми отверстиями листа было произведено исследование указанных проводимостей путем моделирования на проводящей бумаге.

Удельная поверхностная проводимость  $\gamma_0$  проводящей бумаги была определена следую-

щим образом. Из проводящей бумаги вырезалась полоска длиной  $l$  и шириной  $b$ , по ней пропускался ток  $I$  и при этом измерялось напряжение  $U_1, U_2 \dots U_n$  на участках длиной  $l_1, l_2 \dots l_n$ , являющихся частью указанной полоски. Удельная поверхностная проводимость  $\gamma_1, \gamma_2 \dots \gamma_n$  определялась по соотношениям

$$\gamma_1 = \frac{Il_1}{U_1 b}; \gamma_2 = \frac{Il_2}{U_2 b}; \gamma_n = \frac{Il_n}{U_n b}.$$

За истинное значение удельной проводимости принималось среднее значение указанных проводимостей

$$\gamma_0 = (\gamma_1 + \gamma_2 + \dots + \gamma_n) / n.$$

Удельное поверхностное сопротивление  $\rho_0$  определялось по соотношению

$$\rho_0 = 1 / \gamma_0.$$

Измерение тока производилось миллиамперметром типа М 1109, для измерения напряжения был использован вольтметр типа М 1108, имеющий большое сопротивление, благодаря чему ток в вольтметре оказывался значительно меньше тока в проводящей бумаге, несмотря на ее большое сопротивление. А это позволило производить измерения с необходимой степенью точности.

Для того чтобы уменьшить работу по изготовлению модели перфорированного листа из проводящей бумаги, целесообразно заметить, что при ориентации тока по оси  $OB$  указанными линиями являются отрезки  $MN$  (рис. 3).

Таким образом, для проведения исследования был избран не целый лист, а его части, изображенные на рис. 5. Боковыми границами этих частей оказались указанные выше отрезки силовых линий.

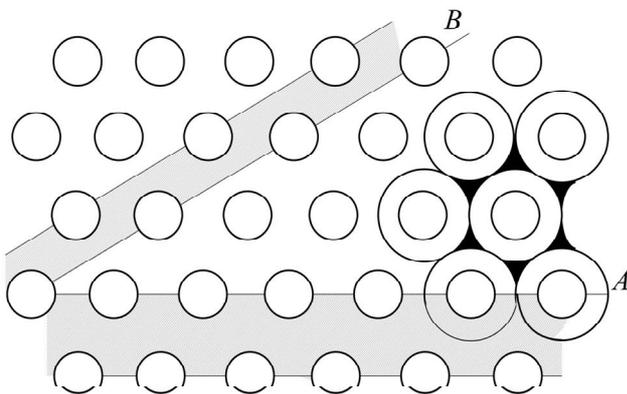


Рис. 5. Область исследования проводимости перфорированного катодного листа с помощью проводящей бумаги

Было признано целесообразным охватить не менее восьми отверстий в продольном направлении, т.е. в направлении тока, чтобы избежать краевого эффекта в этом направлении.

На рис. 6 изображены указанные модели. Исследования проводились при следующих значениях параметра:  $\alpha = 0; 0,083; 0,167; 0,25; 0,33; 0,42$ . Полезно заметить, что при ориентации тока по оси  $OA$  (рис. 6, а) ширина полоски составила  $C = 0,866D$ , а расстояние между центрами соседних полуокругов оказалось равным  $D$ . Тогда как при ориентации тока по оси  $OB$  (рис. 6, б) указанные параметры оказались равными соответственно  $C = 0,5 \cdot D; d = 1,732 \cdot D$ .

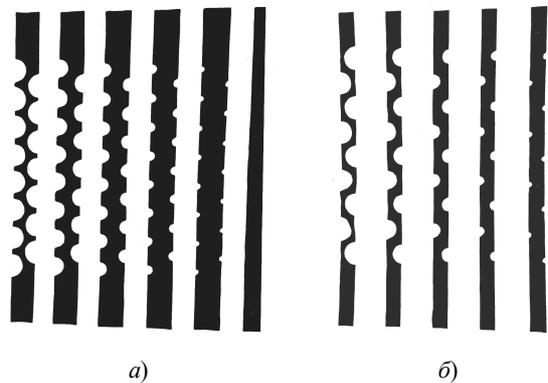


Рис. 6. Область исследования проводимости перфорированного катодного листа с помощью проводящей бумаги. Ток ориентирован: а – по оси  $OA$ ; б – по оси  $OB$

При проведении исследования производилось измерение тока  $I$  в полоске и напряжения  $U$  между определенными её точками, которыми ограничивается исследуемый участок. Сопротивление полосок  $R_{\Pi}$  определялось по соотношению

$$R_{\Pi} = \frac{U}{I}.$$

Для определения эквивалентного удельного поверхностного сопротивления перфорированного листа и соответствующей ему удельной поверхностной проводимости были использованы следующие формулы:

– при ориентации тока по оси  $OA$

$$\gamma_{OA} = \frac{2\sqrt{3}}{3} \frac{n}{R_{\Pi}};$$

– при ориентации тока по оси  $OB$

$$\gamma_{OB} = \frac{2\sqrt{3}n}{R_{\Pi}}.$$

На рис. 7 представлены зависимости  $R_{OA}/R_0$  и  $R_{OB}/R_0$  от  $\alpha = r/D$  в пределах от  $\alpha = 0$  до  $\alpha = 0,417$ . Легко видеть, что приведенные зависимости практически совпали. Некоторые расхождения наблюдаются при сравнительно больших значениях параметра  $\alpha$ , где они, согласно изложенному выше, должны быть минимальными ввиду эквипотенциальности отрезков линий, соединяющих центры отверстий.

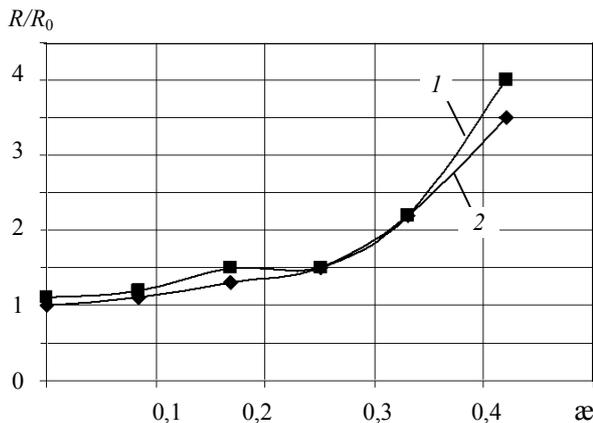


Рис. 7. Опытные зависимости: 1 –  $R_{OA}/R_0$ ; 2 –  $R_{OB}/R_0$  от  $\alpha$

Это говорит о том, что указанное расхождение связано с погрешностью измерений, обусловленных недостаточно большим сопротивлением вольтметра и неоднородностью проводящей бумаги, которая хотя и удовлетворяет соответствующему ГОСТу, однако, может внести заметную погрешность.

#### Пример

Радиус отверстия  $r = 0,001$  м, расстояние между центрами отверстий  $D = 0,004$  м. Удельная проводимость титана  $\gamma_{00} = 2,13 \cdot 10^6$  см/м. Толщина катодного листа  $h = 0,0015$  м. Требуется определить удельную поверхностную проводимость  $\gamma$  перфорированного катода.

В соответствии с рассмотренным выше алгоритмом:

1. Поверхностная проводимость сплошного листа

$$\gamma_0 = \gamma_{00} h = 2,13 \cdot 10^6 \cdot 0,0015 = 3,19 \cdot 10^3 \text{ см.}$$

**Беляев Владимир Львович** – д-р техн. наук, профессор Национального минерально-сырьевого университета «Горный».

**Шалагинов Алексей Анатольевич** – аспирант Национального минерально-сырьевого университета «Горный».

2. Параметр

$$\alpha = r/D = 0,001/0,004 = 0,25.$$

3. Отношение  $\rho/\rho_0$  удельного поверхностного сопротивления перфорированного листа к удельному поверхностному сопротивлению сплошного листа. Определяется по графику на рис. 7:

$$\rho/\rho_0 = 1,40.$$

4. Отношение удельной поверхностной проводимости  $\gamma$  перфорированного листа к удельной поверхностной проводимости  $\gamma_0$  сплошного листа:

$$\gamma/\gamma_0 = 1/(\rho/\rho_0) = 1/1,40 = 0,714.$$

5. Удельная поверхностная проводимость перфорированного листа

$$\gamma = \gamma_0 (\gamma/\gamma_0) = 3,19 \cdot 10^3 \cdot 0,714 = 2,28 \cdot 10^3 \text{ см.}$$

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Файнштейн С.Я. Производство хлора методом диафрагменного электролиза. Л.: Химия, 1964. 250 с.
2. Якименко Л.М. Производство хлора, каустической соды и неорганических хлорпродуктов. М.: Химия, 1974. 600 с.
3. Способ экономии электроэнергии в электролизных цехах предприятий / В.Л. Беляев, Н.Н. Дзекцер, А.А. Шалагинов и др. // Электротехническое производство. Отрасл. информ. сб. 1990. Вып. 4 (28). С. 28 – 29.
4. Влияние параметров электродов на поперечную проводимость / В.В. Банников, М.А. Рамбов, А.М. Сегаль, А.А. Шалагинов. Харьков: ВНИИэлектроаппарат, 1990. С. 84.
5. Экспериментальные установки для исследования сильноточных контактных систем / В.Л. Беляев, А.М. Сегаль, М.П. Румако, А.А. Шалагинов / Ленингр. гос. техн. университет. Л., 1990. С. 114.
6. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. В трех частях: учеб. для электротехн., энерг., спец. вузов. М.: Высш. шк., 1961. 793 с.

## RESEARCH OF ANISOTROPY CONDUCTIVITY OF INTERNAL PARAMETERS ELECTRODES ELECTROLYSERS OF THE CHEMICAL INDUSTRY

**V.L. Belyaev**, National Mineral Resources University «University of Mines». Russian Federation, 199106, St. Petersburg, 21 Line, 2.

**A.A. Shalaginov**, National Mineral Resources University «University of Mines». Russian Federation, 199106, St. Petersburg, 21 Line, 2.

*Modeling of the internal contact connections resistance of electrolysis plants is important to a problem solution of energy savings in companies with energy-intensive production with rated currents of 40-150 kA that is a complex mathematical problem. In electrolytic plants, suppression grids, steeped into the solution in the electrolytic bath, are used as electrodes, and their deformation leads to an uneven current distribution on the electrode surface and insufficient performance of the electrolyser. It is suggested to produce electrodes of perforated steel sheets. Using calculation of complex electric fields, a method for optimizing the geometrical characteristics of the electrolysis baths has been developed, in order to reduce their internal resistance and even current distribution in them. The value of the electrolyser's conductivity has been obtained, depending on apertures radius, the distance between their centers and sheets' thickness. The electrodes modeling and a study of their conductivity have been performed; conductivity values of the electrolysis bath have been obtained, depending on the changes in these parameters.*

*Key words:* voltage fall, resistance, conductivity, a contact connection, potential, electrolyser, diaphragm, anisotropy, cathode, sheet.

### REFERENCES

1. Faynshteyn S.Ya. *Proizvodstvo khlora metodom diafragmennogo elektroliza* [Chlorine production by diaphragm electrolysis]. Leningrad, Khimiya Publ., 1964, 250 p.
2. Yakimenko L.M. *Proizvodstvo khlora, kaustiche-skoy sody i neorganicheskikh khlorproduktov* [Production of chlorine, caustic soda and, inorganic chlorine products]. Moscow, Khimiya Publ., 1974, 600 p.
3. Belyaev V.L., Dzektser N.N., Shalaginov A.A. et al. *Sposob ekonomii elektroenergii v elektroliznykh tsekhakh predpriyatiy. Elektrotekhnicheskoe proizvodstvo. Otrasl. inform. sb.*, 1990, is. 4 (28), pp. 28–29.
4. Bannikov V.V., Rambov M.A., Segal' A.M., Shalaginov A.A. *Vliyaniye parametrov elektrodov na poperechnuyu provodimost'* [Parameters Influence of electrodes on transverse conductivity]. Kharkiv, VNIlektroapparat, 1990, pp. 84.
5. V.L. Belyaev, A.M. Segal', M.P. Rumako, A.A. Shalaginov. *Eksperimental'nye ustanovki dlya issledovaniya sil'notochnykh kontaknykh sistem* [The experimental setup to study high-contact systems]. Leningrad, Leningr. gos. tekhn. universitet, 1990, pp. 114.
6. Bessonov L.A. *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki. V trekh chastyakh.* [Theory of Electrical Engineering. In three parts.]. Moscow, Vyssh. shk. Publ., 1961, 793 p.

*Information about the authors:*

**Vladimir L. Belyaev**, Doctor of Technical Sciences, Professor. E-mail: rimsinc@mail.ru

**Alexey A. Shalaginov**, Graduate Student. E-mail: E-mail: rimsinc@mail.ru

*Received 14 April 2014*