



Оригинальные статьи

Научная статья

УДК: 541.13:544.726

<https://doi.org/10.17308/kcmf.2022.24/10554>

**Влияние кислотной активации бентонита в составе биполярной мембраны на характеристики электродиализной конверсии сульфата натрия**

С. И. Нифталиев<sup>1</sup>, О. А. Козадерова<sup>1</sup>, К. Б. Ким<sup>1✉</sup>, П. Е. Белоусов<sup>2</sup>, В. В. Крупская<sup>2</sup>, А. В. Тимкова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Воронежский государственный университет инженерных технологий  
пр. Революции, 19, Воронеж 394036, Российская Федерация

<sup>2</sup>Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН,  
пер. Старомонетный, д. 35, Москва 119017, Российская Федерация

**Аннотация**

Изучено влияние на характеристики процесса электродиализа кислотной активации бентонита, входящего в катионообменный слой экспериментальной биполярной мембраны, полученной путем нанесения на анионообменную мембрану-подложку МА-41 жидкого катионообменного слоя ЛФ-4СК, содержащего частицы бентонита.

Кислотная активация бентонита осуществлялась азотной кислотой ( $C = 1$  и  $4$  моль/дм<sup>3</sup>) в течение 6 часов, при температурах 20 и 90 °С. Проведена конверсия сульфата натрия ( $C = 0.5$  моль/дм<sup>3</sup>) в шестисекционном электродиализном аппарате с экспериментальными биполярными мембранами, содержащими бентонит в исходном виде и после кислотной активации. Показано, что добавление в катионообменный слой биполярной мембраны бентонита, обработанного азотной кислотой ( $C = 4$  моль/дм<sup>3</sup>,  $t = 90$  °С,  $\tau = 6$  ч), приводит к увеличению производительности, выхода по току и снижению энергетических затрат по сравнению с мембраной, содержащей бентонит в исходном виде.

Экспериментальные биполярные мембраны, изготовленные на основе МА-41 и жидкого сульфокатионообменника, содержащего кислотно-активированные бентонитовые глины, позволяют получить производительность по кислоте и щелочи, сопоставимые с биполярной мембраной МБ-3.

**Ключевые слова:** электродиализ, биполярная мембрана, кислотная активация, бентонит, сульфат натрия, кислота, щелочь

**Источники финансирования:** работа выполнена в рамках гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых - кандидатов наук (МК-685.2021.1.3).

**Для цитирования:** Нифталиев С. И., Козадерова О. А., Ким К. Б., Белоусов П. Е., Крупская В. В., Тимкова А. В. Влияние кислотной активации бентонита в составе биполярной мембраны на характеристики электродиализной конверсии сульфата натрия. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2022;24(4): 504–510. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2022.24/10554>

**For citation:** Niftaliev S. I., Kozaderova O. A., Kim K. B., Belousov P. E., Krupskaya V. V., Timkova A. V. The influence of acid activation of bentonite in the composition of a bipolar membrane on the characteristics of the electro dialysis conversion of sodium sulphate. *Condensed Matter and Interphases*. 2022;24(4): 504–510. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2022.24/10554>

✉ Ким Ксения Борисовна, e-mail: [kmkseniya@yandex.ru](mailto:kmkseniya@yandex.ru)

© Нифталиев С. И., Козадерова О. А., Ким К. Б., Белоусов П. Е., Крупская В. В., Тимкова А. В., 2022



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

## 1. Введение

Электродиализ с биполярными мембранами – это технология производства кислот и оснований без образования вторичных побочных продуктов и использования дополнительных химических реагентов [1–4]. Эффективность процесса электродиализа во многом определяется электрохимическими характеристиками используемых биполярных мембран [5–7]. Для улучшения их свойств в биполярную область мембраны вводят каталитические добавки различной природы, влияющие на диссоциацию молекул воды [8–16]. Есть данные, что силикатные и гидроксильные группы являются эффективными катализаторами диссоциации воды в биполярной области [17–18]. Добавление частиц глинистого материала в биполярную ионообменную мембрану позволяет получить нанокомпозит с улучшенными характеристиками [19–21], что объясняется особенностью строения и состава глины, а также наличием таких свойств, как гидрофильность и способность к ионному обмену. Для улучшения свойств глины проводят ее химическую активацию, например, обработку солями натрия или кальция [22], а также термическую активацию [23]. Среди различных методов кислотная обработка является наиболее эффективным способом активации поверхности и увеличения ее удельной площади, что происходит в результате модификации компонентов бентонитовых глин, прежде всего монтмориллонита и других глинистых минералов [24–26].

Целью работы является изучение влияния кислотной активации бентонита в составе экспериментальной биполярной мембраны на ха-

рактеристики электродиализной конверсии сульфата натрия.

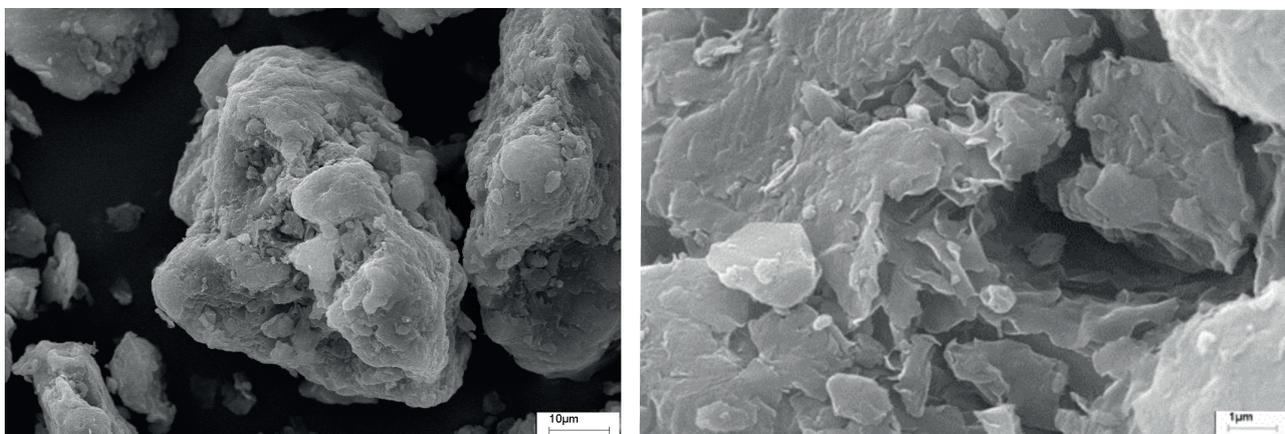
## 2. Экспериментальная часть

Экспериментальная ионообменная биполярная мембрана была получена путем нанесения на анионообменную мембрану МА-41 слоя жидкого сульфополимера ЛФ-4СК, содержащего частицы бентонита, по известной методике [27]. В настоящей работе в катионообменный слой мембраны добавляли бентонит месторождения Требия (Марокко) (рис. 1). Образец природного бентонита на 76 % состоит из смектита, в виде примесей присутствуют: 5 % иллита, 5 % кварца, 21 % полевого шпата, 2 % кальцита [26]. Смектит представлен щелочным монтмориллонитом с преобладанием катионов натрия в межслое, основной заряд локализован в октаэдрическом слое.

Для кислотной обработки бентонита использовали азотную кислоту различной концентрации (1 и 4 моль/дм<sup>3</sup>), процесс проводили при постоянном перемешивании при температурах 20 и 90 °С. Далее твердую фазу промывали дистиллированной водой до нейтрального значения pH и высушивали при 60 °С до постоянной массы.

В работе рассмотрены четыре типа экспериментальных биполярных мембран, в катионообменный слой которых добавлен бентонит (3 % по масс.):

- МБ<sub>МАР.ИСХ</sub> – исходный бентонит;
- МБ<sub>МАР1</sub> – бентонит, обработанный при следующих условиях:  $C(\text{HNO}_3) = 1 \text{ моль/дм}^3$ ,  $t = 20^\circ\text{C}$ ,  $\tau = 6 \text{ ч}$ ;
- МБ<sub>МАР2</sub> –  $C(\text{HNO}_3) = 1 \text{ моль/дм}^3$ ,  $t = 90^\circ\text{C}$ ,  $\tau = 6 \text{ ч}$ ;



**Рис. 1.** Изображения поверхности воздушно-сухого образца бентонита (месторождение Требия, Марокко), полученного методом сканирующей электронной микроскопии (LEO 1450VPCarlZeiss) при разном увеличении

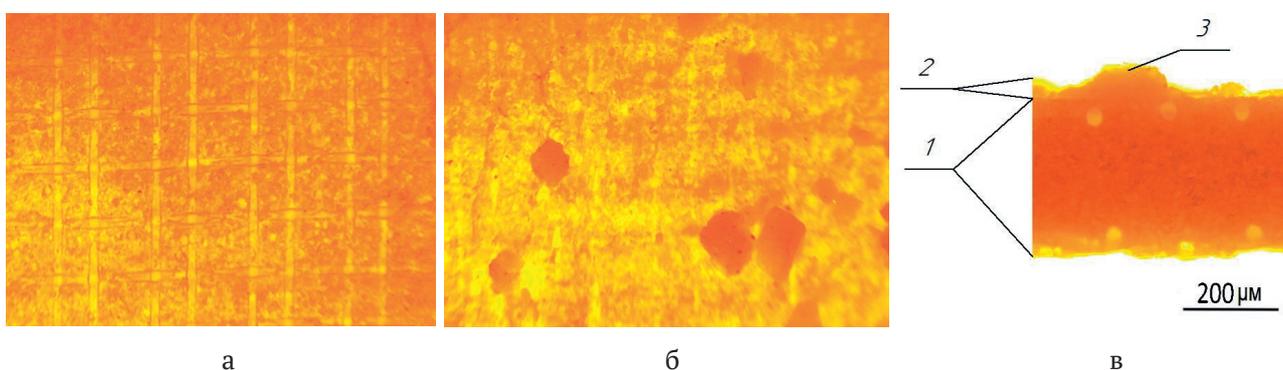
– МБ<sub>МАР2</sub> – C(HNO<sub>3</sub>) = 4 моль/дм<sup>3</sup>, t = 90 °С, τ = 6 ч.

Изображение поверхности и среза экспериментальной биполярной мембраны с частицами бентонита получали на оптическом микроскопе Levenhuk 625 (рис. 2).

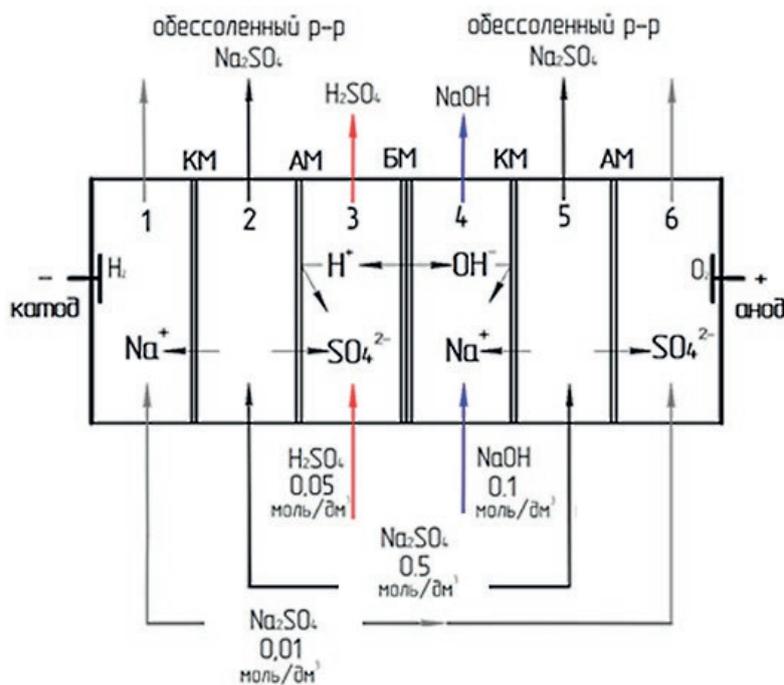
Свойства экспериментальных ионообменных мембран изучали при электродиализе раствора сульфата натрия (0.5 моль/дм<sup>3</sup>) и сравнивали с лучшей отечественной биполярной мембраной МБ-3 (ОХК «Щекиноазот»), имеющей наименьшее электросопротивление при эксплуатации [28].

Исследования проводили в шестисекционной электродиализной ячейке проточного типа (рис. 3), состоящей из исследуемой биполярной мембраны, гетерогенных катионо- (RalexС-МН-РР) и анионообменных (Ralex АМН-РР) мембран производства МЕГА (Чехия) [29].

Концентрацию получаемых в процессе конверсии сульфата натрия кислоты и щелочи определяли кислотно-основным титрованием. Эффективность процесса электродиализа (потоки ионов водорода и гидроксила, генерированных внутри биполярной мембраны, J, моль/(см<sup>2</sup>·с); выход по току η, %; удельные энергозатраты на



**Рис. 2.** Фотографии мембран (оптический микроскоп Levenhuk 625): а – поверхность анионной мембраны подложки МА-41; б – поверхность катионообменного слоя с частицами бентонита; в – экспериментальная биполярная мембрана (1 – мембрана-подложка, 2 – катионообменный слой, 3 – частица бентонитовой глины на поверхности катиообменного слоя)



**Рис. 3.** Схема потока ионов в камерах электродиализной ячейки в процессе конверсии сульфата натрия (C = 0.5 моль/дм<sup>3</sup>): КМ – катионообменная мембрана, АМ – анионообменная мембрана, БМ – биполярная мембрана

производство целевого продукта  $W$ , кВт·ч/кг) рассчитывали по следующим формулам:

$$J_i = \frac{(C_0 - C_i) \cdot V}{\tau \cdot S}, \tag{1}$$

$$\eta = \frac{(C_0 - C_i) \cdot V \cdot F}{\tau \cdot I} \cdot 100, \tag{2}$$

$$W = \frac{I \cdot U \cdot \tau}{m}, \tag{3}$$

где  $C_0$  – исходная концентрация раствора, моль/дм<sup>3</sup>;  $C_i$  – концентрация ионов в исследуемой секции, моль/дм<sup>3</sup>;  $V$  – объем раствора, дм<sup>3</sup>;  $F$  – число Фарадея А·с/моль;  $\tau$  – время, с;  $I$  – сила тока, А;  $U$  – напряжение, В;  $m$  – масса продукта, кг.

### 3. Результаты и их обсуждение

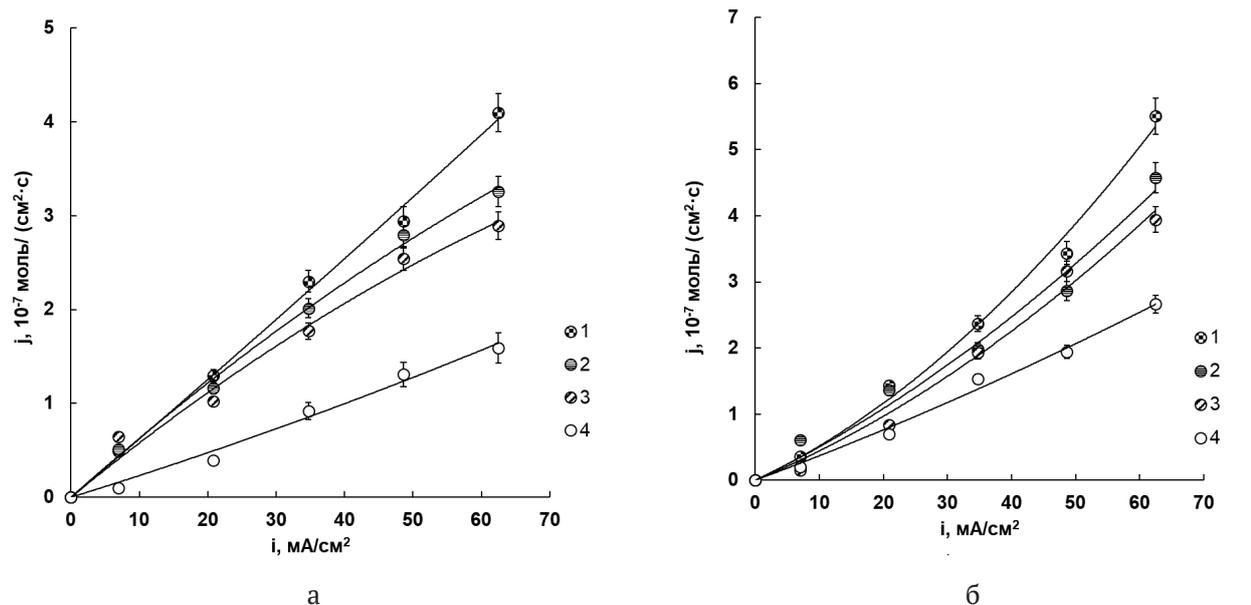
Полученные экспериментальные результаты (рис. 4) позволяют сделать вывод, что кислотная

активация бентонита, вводимого в биполярную мембрану, приводит к увеличению потока ионов  $H^+$  в 2.5 раза, а  $OH^-$  в 2.1 раза.

Добавление кислотно-обработанного бентонита в катионообменный слой биполярной мембраны также приводит к снижению энергетических затрат (рис. 5).

Биполярные ионообменные мембраны, содержащие кислотно-активированный бентонит ( $MB_{МАР3}$ ), по производительности и выходу по току не уступают промышленным образцам МБ-3 [3] (табл. 1).

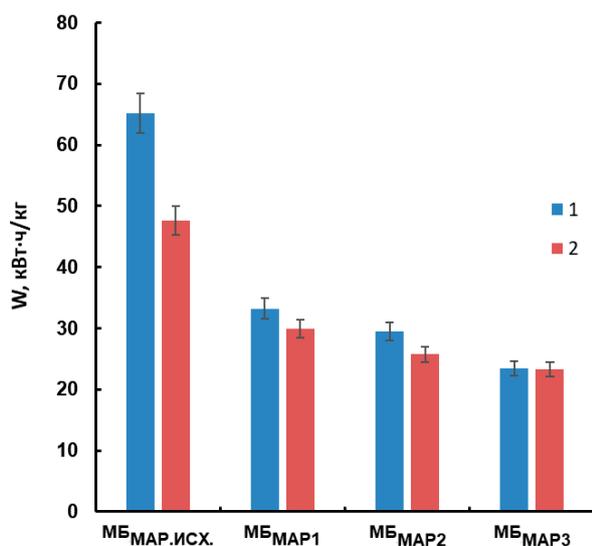
Полученные результаты можно объяснить тем, что во время кислотной активации происходят значительные изменения в составе и структуре монтмориллонита. Содержание глинозема в образце снизилось с 23.3 до 7.6 %, оксида магния – с 2.4 до 0.5 %, а кремнезема увеличилось с 59.5 до 80.22 % [26]. Это связано с замещением межслоевых катионов ионами оксо-



**Рис. 4.** Зависимость потоков ионов  $H^+$  (а) и  $OH^-$  (б), генерированных в биполярной мембране, от плотности тока для экспериментальных образцов: 1 –  $MB_{МАР3}$ , 2 –  $MB_{МАР2}$ , 3 –  $MB_{МАР1}$ , 4 –  $MB_{МАР.ISX}$

**Таблица 1.** Характеристики процесса конверсии сульфата натрия при электродиализе с  $MB-3$  и экспериментальными мембранами (при плотности тока  $i = 60 \text{ mA/cm}^2$ )

	$H_2SO_4$		NaOH	
	$P$ , моль/м <sup>2</sup> ·ч	$\eta$ , %	$P$ , моль/м <sup>2</sup> ·ч	$\eta$ , %
$MB_{МАР.ISX}$	$2.91 \pm 0.29$	25.01	$9.58 \pm 0.96$	41.11
$MB_{МАР1}$	$5.24 \pm 0.52$	44.70	$16.46 \pm 1.65$	60.89
$MB_{МАР2}$	$5.90 \pm 0.59$	50.30	$14.19 \pm 1.42$	70.58
$MB_{МАР3}$	$7.43 \pm 0.74$	63.10	$19.82 \pm 1.98$	85.02
МБ-3[3]	$6.93 \pm 0.69$	59.21	$18.10 \pm 1.81$	77.10



**Рис. 5.** Энергетические затраты на получение целевого продукта (при плотности тока  $i = 60 \text{ mA/cm}^2$ ): 1 –  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , 2 –  $\text{NaOH}$

ния, выщелачиванием октаэдрических катионов и частичным разрешением слоя 2:1 и, как следствие, образованием аморфного кремнезема [26]. Также после кислотной обработки уменьшается средний размер агрегатов глинистых частиц с 270 до 150 нм [26]. Величина удельной поверхности увеличивается с 26 до  $78 \text{ m}^2/\text{г}$  с одной стороны за счет увеличения доли аморфного кремнезема, с другой стороны – за счет модификации поверхности и увеличения микропористости (общий объем пор увеличился с  $0.431$  до  $4.397 \text{ cm}^3/\text{г}$ ) [30]. Таким образом, улучшение характеристик электролиза при использовании биполярных мембран, содержащих кислотно-активированный бентонит, связано с увеличением в бентоните каталитически-активных по отношению к реакции диссоциации воды кремниевых групп и, возможно, улучшением диспергирования глинистых частиц бентонита в жидком сульфополимере.

#### 4. Выводы

Проведенные исследования показали, что добавление кислотно-активированного бентонита в катионообменный слой биполярной мембраны увеличивает диссоциацию молекул воды. Активация азотной кислотой ( $C = 4 \text{ моль/дм}^3$ ,  $t = 90 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\tau = 6 \text{ ч}$ ) бентонита, входящего в состав экспериментальной биполярной мембраны, улучшает характеристики электролизной конверсии сульфата натрия по сравнению с мембраной, содержащей бентонит в ис-

ходном виде (для  $\text{H}^+$  производительность и выход по току увеличиваются в 2.5 раза, энергетические затраты на получение целевого продукта уменьшаются в 2.7 раза; для  $\text{OH}^-$  производительность и выход по току увеличиваются в 2.1 раза, энергетические затраты на получение целевого продукта уменьшаются в 2 раза). Это связано с тем, что при кислотной активации происходит увеличение содержания кремниевых групп в бентоните, ускоряющих диссоциацию молекул воды, а значит и скорость генерации  $\text{H}^+$  и  $\text{OH}^-$  в биполярной области мембраны значительно возрастает. Также при обработке бентонита азотной кислотой наблюдается уменьшение размера частиц и увеличение удельной площади поверхности и микропористости, что, вероятно, улучшает диспергирование частиц бентонита в жидком полимере ЛФ-4СК.

Использование биполярной мембраны с кислотно-активированным бентонитом позволяет получить потоки  $\text{H}^+/\text{OH}^-$  - ионов при конверсии сульфата натрия, сопоставимые с потоками этих ионов, полученными с применением биполярной мембраны МБ-3 (наилучшего отечественного образца).

#### Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет известных финансовых конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в этой статье.

#### Список литературы

1. Melnikov S. S., Mugtamonov O. A., Zabolotsky V. I. Study of electro dialysis concentration process of inorganic acids and salts for the two-stage conversion of salts into acids utilizing bipolar electro dialysis. *Separation and Purification Technology*. 2020;235: 116198–116208. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.116198>
2. Wiśniewski J., Wiśniewska G., Winnicki T. Application of bipolar electro dialysis to the recovery of acids and bases from water solutions. *Desalination*. 2004;169(1): 11–20. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2004.08.003>
3. Козадерова О. А., Нифталиев С. И., Ким К. Б. Применение биполярных мембран МБ-2, модифицированных гидроксидом хрома (III), для конверсии сульфата натрия. *Известия высших учебных заведений. Серия: химия и химическая технология*.

2019;62(3): 30–36. <https://doi.org/10.6060/ivkkt201962fp.5811>

4. Öner M. R., Kanca A., Ata O. N., Yapıcı S., Yaylalı N. A. Bipolar membrane electrodialysis for mixed salt water treatment: Evaluation of parameters on process performance. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2021;9(4): 105750–105763. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105750>

5. Нифталиев С. И., Козадерова О. А., Ким К. Б. Применение биполярного электролиза с модифицированными мембранами при очистке хромсодержащих сточных вод гальванического производства. *Экология и промышленность России*. 2021;25(10): 4–9. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2021-10-4-9>

6. Пурселли Ж. Электролиз с биполярными мембранами: основы метода, оптимизация, применения. *Электрохимия*. 2002;38(8): 1026–1033. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44584769>

7. Заболоцкий В. И., Утин С. В., Лебедев К. А., Василенко П. А., Шельдешов Н. В. Исследование процесса коррекции pH разбавленных хлоридно-гидрокарбонатных растворов электролизом с биполярными мембранами. *Электрохимия*. 2012;48(7): 842–848. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17745849>

8. Kovalev N. V., Karpenko T. V., Sheldeshov N. V., Zabolotsky V. I. Preparation and electrochemical properties of heterogeneous bipolar membranes with a catalyst for the water dissociation reaction. *Membranes and Membrane Technologies*. 2021;3: 231–244. <https://doi.org/10.1134/S251775162104003X>

9. Mel'nikov S. S., Shapovalova O. V., Shel'deshov N. V., Zabolotsky V. I. Effect of d-metal hydroxides on water dissociation in bipolar membranes. *Petroleum Chemistry*. 2011;51: 577–584. <https://doi.org/10.1134/S0965544111070097>

10. Xue Y.-H., Fu R.-Q., Fu Yan-xun, Xu T.-W. Fundamental studies on the intermediate layer of a bipolar membrane. V. Effect of silver halide and its dope in gelatin on water dissociation at the interface of a bipolar membrane. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2006;298: 313–320. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2005.11.049>

11. Liu Y., Chen J., Chen R., Zhou T., Ke C., Chen X. Effects of multi-walled carbon nanotubes on bipolar membrane properties. *Mater. Chem. Phys*. 2018;203: 259–265. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2017.09.068>

12. Manohar M., Das A. K., Shahi V. K. Efficient bipolar membrane with functionalized graphene oxide interfacial layer for water splitting and converting salt into acid/base by electrodialysis. *Industrial and Engineering Chemistry Reseach*. 2018;57: 1129–1136. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.7b03885>

13. Martínez R. J., Farrell J. Water splitting activity of oxygen-containing groups in graphene oxide catalyst in bipolar membranes. *Computational and Theoretical Chemistry*. 2019;1164: 112556. <https://doi.org/10.1016/j.comptc.2019.112556>

14. Simons R. Water splitting in ion exchange membranes. *Electrochimica Acta*. 1985;30(3): 275–282. [https://doi.org/10.1016/0013-4686\(85\)80184-5](https://doi.org/10.1016/0013-4686(85)80184-5)

15. Козадерова О. А. Электрохимические характеристики биполярной мембраны МБ-2, объемно модифицированной наноразмерным гидроксидом хрома (III). *Российские нанотехнологии*. 2018;13 (9-10): 508–515. <https://doi.org/10.1134/S1992722318050084>

16. Cheng G., Zhao Y., Li W., Zhang J., Wang X., Dong C. Performance enhancement of bipolar membranes modified by Fe complex catalyst. *Journal of Membrane Science*. 2019;589: 117243. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2019.117243>

17. Kang M.-S., Choi Y.-J., Lee H.-J., Moon S.-H. Effects of inorganic substances on water splitting in ion-exchange membranes; I. Electrochemical characteristics of ion-exchange membranes coated with iron hydroxide/oxide and silica sol. *Journal Colloid and Interface Science*. 2003;273 (2): 523–532. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2004.01.050>

18. Kang M.-S., Choi Y.-J., Lee H.-J., Moon S.-H. Effects of inorganic substances on water splitting in ion-exchange membranes. II. Optimal contents of inorganic substances in preparing bipolar membranes. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2004;273: 533–539. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2004.01.051>

19. Eswaraswamy B., Suhag A., Goel P., Mandal P., Chattopadhyay S. Potential of montmorillonite nanoclay as water dissociation catalyst at the interface of bipolar membrane. *Separation and Purification Technology*. 2022;295: 121257–121268. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.121257>

20. Козадерова О. А., Ким К. Б., Белоусов П. Е., Тимкова А. В., Нифталиев С. И. Электролиз раствора сульфата натрия с экспериментальными бентонит-модифицированными биполярными мембранами. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2021;23(4): 518–528. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2021.23/3670>

21. Peng F., Peng S., Huang C., Xu T. Modifying bipolar membranes with palygorskite and FeCl<sub>3</sub>. *Journal of Membrane Science*. 2008;322: 122–127. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2008.05.027>

22. Lin J., Jiang B., Zhan Y. Effect of pre-treatment of bentonite with sodium and calcium ions on phosphate adsorption onto zirconium-modified bentonite. *Journal of Environmental Management*. 2018;217: 183–195. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.03.079>

23. Masindi V., Ramakokovhu M. M. The performance of thermally activated and vibratory ball milled

South African bentonite clay for the removal of chromium ions from aqueous solution. *Materials Today: Proceedings*. 2021;38 (2): 964–974. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.490>

24. Komadel P. Acid activated clays: Materials in continuous demand. *Applied Clay Science*. 2016;131: 84–99. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2016.05.001>

25. Атаманова О. В., Тихомирова Е. И., Касымбеков Ж. К., Подоксенов А. А. Повышение сорбционной способности модифицированного бентонита при очистке сточных вод путем его активации. *Вода и экология: проблемы и решения*. 2020;1(81): 3–12. <https://doi.org/10.23968/2305-3488.2020.25.1.3-12>

26. Krupskaya V., Novikova L., Tyupina E., Belousov P., Dorzhieva O., Zakusin S., Kim K., Roessner F., Badetti E., Brunelli A., Belchinskaya L. The influence of acid modification on the structure of montmorillonites and surface properties of bentonites. *Applied Clay Science*. 2019;172: 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2019.02.001>

27. Нифталиев С. И., Козадерова О. А., Ким К. Б., Белоусов П. Е., Тимкова А. В., Головков И. А. Получение бентонит-модифицированных биполярных ионообменных мембран и изучение их электрохимических характеристик. *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*. 2021;3(89): 216–225. <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2021-3-216-225>

28. Заболоцкий В. И., Березина Н. П., Никоненко В. В., Шудренко А. А. Развитие мембранных технологий на основе электролиза в России. *Наука Кубани*. 2010;3: 4–10. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23764497>

29. *Свойства мембран*. Режим доступа: <http://www.ralex.eu/Membrany/Uvod.aspx>

30. Timofeeva M. N., Panchenko V. N., Gil A., Vicente M. A. Effect of nitric acid modification of montmorillonite clay on synthesis of solketal from glycerol and acetone. *Catalysis Communications*. 2017;90: 65–69. <https://doi.org/10.1016/j.catcom.2016.11.020>

## Информация об авторах

*Нифталиев Сабухи Илич-оглы*, д. х. н., профессор, заведующий кафедрой неорганической химии и химической технологии, Воронежский государственный университет инженерных технологий (Воронеж, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0001-7887-3061>  
sabukhi@gmail.com

*Козадерова Ольга Анатольевна*, д. х. н., профессор кафедры неорганической химии и химической технологии, Воронежский государственный университет инженерных технологий (Воронеж, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0002-8135-5801>  
kozaderova-olga@mail.ru

*Ким Ксения Борисовна*, к. х. н., доцент кафедры неорганической химии и химической технологии, Воронежский государственный университет инженерных технологий (Воронеж, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0001-5564-8267>  
kmseniya@yandex.ru

*Белоусов Петр Евгеньевич*, к. г.-м. н., с. н. с., Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (Москва, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0002-2657-5828>  
pitbl@mail.ru

*Крупская Виктория Валерьевна*, к. г.-м. н., с. н. с., Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (Москва, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0002-6127-748X>  
krupskaya@ruclay.com

*Тимкова Анна Васильевна*, аспирант кафедры неорганической химии и химической технологии, Воронежский государственный университет инженерных технологий (Воронеж, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0003-0630-2993>  
timkova.anna@mail.ru

Поступила в редакцию 15.07.2022; одобрена после рецензирования 15.09.2022; принята к публикации 15.10.2022; опубликована онлайн 25.12.2022.