

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПЕРЕРАБОТКИ СТОЧНЫХ ВОД
ПРОИЗВОДСТВА БИКАРБОНАТА НАТРИЯ С ПОЛУЧЕНИЕМ ГИДРОКСИДА НАТРИЯ**

Н.А. Быковский, Е.Г. Винокуров, Н.С. Шулаев

Николай Алексеевич Быковский*, Николай Сергеевич Шулаев

Уфимский государственный нефтяной технический университет - Филиал в г. Стерлитамаке,
пр. Октября, 2, Стерлитамак, Башкортостан, Российская Федерация, 2453118
E-mail: nbikovsky@list.ru*, nshulayev@rambler.ru

Евгений Геннадьевич Винокуров

Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет),
Московский просп., 26, Санкт-Петербург, Российская Федерация, 190013
E-mail: vin-62@mail.ru

В статье представлены результаты исследования получения бикарбоната натрия с целью создания замкнутого производства, основанного на переработке его отходов. Производство очищенного бикарбоната натрия сопровождается образованием сточных вод, содержащих в своем составе как карбонат, так и бикарбонат натрия. В расчете на 1 т очищенного бикарбоната натрия в процессе производства образуется до 1,5 м³ сточной воды. Сточная вода содержит около 23,5 г/л карбоната натрия и около 40,4 г/л бикарбоната натрия. В данной статье приведены результаты исследований по переработке сточных вод, образующихся в производстве очищенного бикарбоната натрия. Сточные воды перерабатывали в мембранном электролизере с катионообменной мембраной марки МК-40. Процесс переработки сточной воды осуществлялся при мембранной плотности тока, изменяющейся от 30 мА/см² до 60 мА/см². Показано, что в процессе электрохимической переработки сточной воды, загруженной в анодное отделение электролизера, сначала из нее происходит извлечение карбоната натрия, а затем бикарбоната натрия. Одновременно с этим в процессе электролиза в катодном отделении электролизера происходит образование гидроксида натрия. Максимальная концентрация гидроксида натрия, достигнутая в процессе, составила величину 362 г/л. Выход по току процесса электролиза, рассчитанный по изменению концентрации гидроксида натрия, зависит от мембранной плотности тока. Максимальное значения выхода по току наблюдается при плотности тока 30 мА/см² и равняется 64,3%. Удельные затраты электроэнергии на получение гидроксида натрия возрастают с увеличением плотности тока. Минимальные затраты электроэнергии составили 2,2 кВт·ч/кг полученной гидроксида натрия.

Ключевые слова: бикарбонат натрия, карбонат натрия, сточные воды, электролиз, катионообменная мембрана, гидроокись натрия

**EXPERIMENTAL ANALYSIS OF EFFICIENCY OF ELECTROCHEMICAL PROCESS
OF PROCESSING WASTE WATER FOR PRODUCTION OF SODIUM BICARBONATE
WITH PRODUCTION OF SODIUM HYDROXIDEN**

N.A. Bykovsky, E.G. Vinokurov, N.S. Shulaev

Nikolay A. Bykovsky*, Nikolay S. Shulaev

Ufa State Petroleum Technological University (Branch in Sterlitamak), Oktyabrya ave., 2, Sterlitamak, Bashkortostan, 453118, Russia
E-mail: nbikovsky@list.ru*, nshulayev@rambler.ru

Evgeny G. Vinokurov

Saint Petersburg State Institute of Technology (Technical University), Moskovsky ave., 26, Saint Petersburg, 190013, Russia

E-mail: vin-62@mail.ru

The production of purified sodium bicarbonate is accompanied by the formation of wastewater containing sodium carbonate and bicarbonate. Up to 1.5 m³ of wastewater is formed per 1 t of purified sodium bicarbonate. Wastewater contains about 23.5 g/l sodium carbonate and about 40.4 g/l sodium bicarbonate. The article presents the results of studies related to the processing of wastewater generated in the production of purified sodium bicarbonate in a membrane electrolyzer with a cation exchange membrane. The waste water treatment process was carried out at a membrane current density of 30 mA/cm² to 60 mA/cm². It is shown that in the process of electrochemical processing of wastewater, sodium carbonate is extracted first, and then sodium bicarbonate is extracted. At the same time, during the electrolysis, sodium hydroxide is formed. The maximum concentration of sodium hydroxide achieved in the process was 362 g/l. The current efficiency of the electrolysis process calculated by changing the concentration of sodium hydroxide depends on the membrane current density. The maximum current efficiency is observed at a current density of 30 mA/cm² and equals 64.3%. The specific energy costs of sodium hydroxide producing increase with increasing current density. The minimum energy consumption was 2.2 kWh/kg.

Key words sodium bicarbonate, sodium carbonate, wastewater, electrolysis, cation exchange membrane, sodium hydroxide

Для цитирования:

Быковский Н.А., Винокуров Е.Г., Шулаев Н.С. Экспериментальный анализ эффективности электрохимического процесса переработки сточных вод производства бикарбоната натрия с получением гидроксида натрия. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2021. Т. 64. Вып. 8. С. 139–145

For citation:

Bykovsky N.A., Vinokurov E.G., Shulaev N.S. Experimental analysis of efficiency of electrochemical process of processing waste water for production of sodium bicarbonate with production of sodium hydroxiden. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2021. V. 64. N 8. P. 139–145

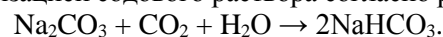
ВВЕДЕНИЕ

Бикарбонат натрия находит применение в различных областях народного хозяйства. В медицине его используют для приготовления различных лекарственных препаратов, нейтрализующих излишнюю кислотность в организме и смягчающих ткань [1-3]. В хлебопекарной промышленности бикарбонат натрия применяют как добавку к тесту, способствующую его поднятию и разрыхлению, что увеличивает пористость хлебных продуктов [4]. Бикарбонат натрия применяется для зарядки пенных и жидкостных огнетушителей [5]. Бикарбонат натрия используется при подземном выщелачивании урана из высококарбонатных руд [6]. Сода и жидкое стекло входят в состав разжижителя, используемого для регулирования реологических свойств керамической суспензии [7].

В соответствии с ГОСТ 2156-76 выпускаемый промышленностью бикарбонат натрия должен содержать не менее 99,5% основного вещества, не более 0,4% карбоната натрия, не более

0,02% хлоридов, не более 0,001% железа, не более 0,04% кальция и не более 0,02% сульфатов.

Очищенный бикарбонат натрия получают карбонизацией содового раствора согласно реакции:



Для этого водный раствор, содержащий около 285 г/л карбоната натрия, насыщают углекислым газом. В процессе происходит образование бикарбоната натрия. Поскольку растворимость в воде бикарбоната натрия в этих условиях практически в 5 раз меньше, чем карбоната натрия [8, 9], бикарбонат натрия образует твердую фазу. После отделения осадка бикарбоната натрия маточную жидкость возвращают в начало процесса для получения исходного раствора карбоната натрия. В результате многократной циркуляции маточной жидкости в ней накапливаются примеси (преимущественно хлорид натрия), что может привести к появлению их в очищенном бикарбонате. Поэтому часть маточной жидкости выводят из процесса. Кроме этой маточной жидкости стоки производства, содержащие карбонат и бикарбонат натрия,

формируются при промывке карбоколонны и промывке фильтров [10-13]. Анализ стоков производства очищенного бикарбоната натрия показал, что в расчете на 1 т бикарбоната натрия образуется до 1,5 м³ сточных вод, содержащих около 23,5 г/л карбоната натрия и около 40,4 г/л бикарбоната натрия [10]. Очевидно, перед сбросом такой сток должен подвергаться многократному разведению. Кроме того, со сточной водой происходит потеря веществ, которые можно использовать для получения продукции.

Известно, что при переработке солевых растворов в мембранных электролизерах возможно получение кислоты и щелочи [14-27]. В статье представлены результаты, полученные при исследовании процесса переработки сточных вод, образующихся в производстве очищенного бикарбоната натрия в мембранном электролизере с получением гидроксида натрия.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследование процесса переработки сточной воды, образующейся в процессе производства очищенного бикарбоната натрия, осуществляли в мембранном электролизере, схематично представленном на рис. 1.

Электролизер представлял собой фильтр-прессную сборку из 7 одинаковых ячеек, разделенных между собой электродными пластинами. Катодами служили пластины из нержавеющей стали, а анодами служили пластины из титана, покрытого окисью рутения. Каждая ячейка состояла из 2 камер, разделенных катионообменной мембраной марки МК-40. Камеры выполнены в виде рамок из поливинилхлорида толщиной 1,9 мм. Для предотвращения соприкосновения мембран с электродами в каждую камеру помещалась сетка просечная растянутая из каландрированного винипласта.

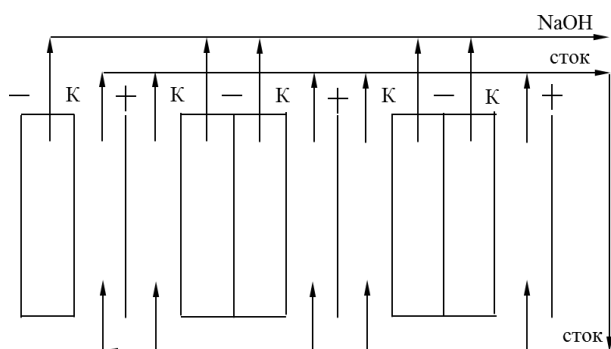


Рис. 1. Схема мембранного электролизера: - катодная пластина; + анодная пластина; К – катионообменная мембрана
Fig. 1. Scheme of a membrane electrolyzer: - cathode plate; + anode plate; K – cation exchange membrane

В анодных камерах циркулировала сточная вода, содержащая карбонат и бикарбонат натрия. В катодных камерах происходила генерация раствора гидроксида натрия, который по мере накопления покидал камеры и собирался в соответствующей емкости. Рабочая поверхность каждой катионообменной мембраны составляла 50 см².

Исследования проводили с модельным раствором стока, содержащим 23,5 г/л карбоната натрия и 40,4 г/л бикарбоната натрия при плотностях тока на мембранах 30 мА/см², 40 мА/см², 50 мА/см² и 60 мА/см². Катодные камеры перед опытами заполняли 0,01 н раствором гидроксида натрия.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Рассмотрим процессы в электролизере на примере работы 1 ячейки (рис. 2). Под действием сил электрического поля ионы натрия мигрируют через катионообменную мембрану из анодного в катодное пространство электролизера. На катоде происходит разложение воды с образованием газообразного водорода и ионов гидроксила. Продвижению ионов гидроксила к аноду препятствует катионообменная мембрана. Вследствие этого в катодном отделении электролизера накапливается гидроокись натрия. На аноде происходит разложение воды с образованием газообразного кислорода и ионов водорода. Ионы водорода взаимодействуют с ионами карбоната и бикарбоната, образуя слабодиссоциирующие кислоты. Последние неустойчивы в водной среде и разлагаются, выделяя углекислый газ. Таким образом, в анодном отделении электролизера происходит снижение концентрации и карбоната, и бикарбоната натрия.

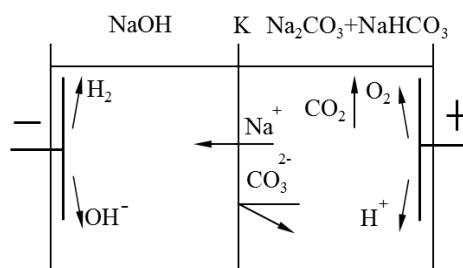


Рис. 2. Схема ячейки электролизера: - катод; + анод; К – катионообменная мембрана

Fig. 2. Scheme of electrolysis cell: - cathode; + anode; K – cation exchange membrane

Для изучения зависимости состава растворов генерируемых в камерах электролизера, от времени процесса была поставлена серия опытов, в которой через каждые 30 мин раствор, покидающий катодные камеры, анализировали на содержание

гидроксида натрия, а раствор, покидающий анодные камеры, анализировали на содержание карбоната и бикарбоната натрия. Объем перерабатываемой сточной воды в этой серии опытов оставался постоянным и составлял величину 2 л.

На рис. 3 приведена зависимость концентрации карбоната натрия от времени обработки сточной воды в мембранном электролизере.

Убыль концентрации карбоната натрия в растворе, перерабатываемом в анодной камере электролизера, с течением времени определяется мембранной плотностью тока. Так при плотности тока 30 мА/см² концентрация карбоната натрия уменьшается со скоростью 5,88 г/(л·ч), а при плотности тока 60 мА/см² скорость убыли карбоната натрия возрастает до 10,68 г/(л·ч). Следует отметить, что карбонат натрия через 4 ч при плотности тока 30 мА/см² и через 2,3 ч при плотности тока 60 мА/см² полностью извлекается из раствора.

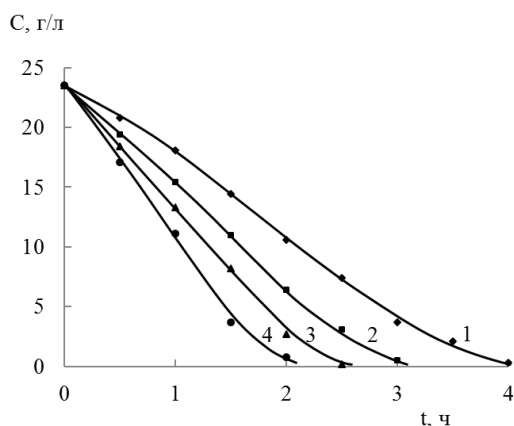


Рис. 3. Зависимость концентрации Na₂CO₃ от времени. Плотность тока, мА/см² 1 - 30; 2 - 40; 3 - 50; 4 - 60
Fig. 3. The dependence of the concentration of Na₂CO₃ on time. Current density, mA/cm² 1 - 30; 2 - 40; 3 - 50; 4 - 60

На рис. 4 представлена зависимость концентрации бикарбоната натрия от времени обработки сточной воды в электролизере.

Зависимость концентрации бикарбоната натрия от времени обработки имеет более сложный характер. В начальные моменты времени (примерно 1 ч) происходит незначительное уменьшение концентрации, затем наблюдается ее рост. Увеличение концентрации бикарбоната натрия продолжается до тех пор, пока содержание карбоната натрия не станет близким к нулю. Указанный эффект сильнее выражен при низких плотностях тока. После извлечения из сточной воды карбоната натрия начинается уменьшение концентрации и бикарбоната.

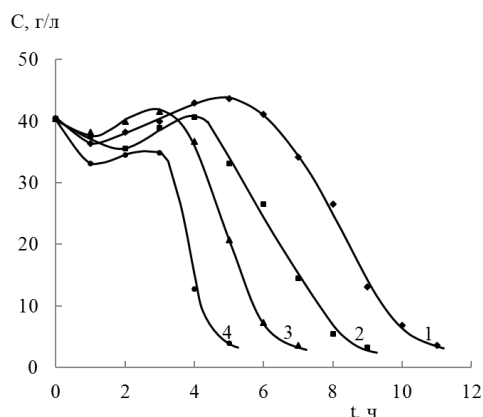


Рис. 4. Зависимость концентрации NaHCO₃ от времени. Плотность тока, мА/см² 1 - 30; 2 - 40; 3 - 50; 4 - 60
Fig. 4. The dependence of the concentration of NaHCO₃ on time. Current density, mA/cm² 1 - 30; 2 - 40; 3 - 50; 4 - 60

Скорость понижения концентрации бикарбоната натрия в сточной воде возрастает от 7,34 г/(л·ч) при плотности тока 30 мА/см² до 15,45 г/(л·ч) при плотности тока 60 мА/см².

На рис. 5 приведена зависимость концентрации гидроксида натрия в катодных камерах от времени обработки сточной воды в электролизере.

Интенсивность увеличения концентрации гидроксида натрия в катодных камерах и ее конечная величина определяются мембранной плотностью тока. Так в начальный момент времени при плотности тока 30 мА/см² скорость роста концентрации щелочи равна 62,9 г/(л·ч), а при плотности тока 60 мА/см² скорость роста концентрации щелочи равна 271,2 г/(л·ч). Максимальное содержание гидроксида натрия в растворе, генерируемом в катодных камерах электролизера, изменяется от 256,8 г/л при плотности тока 30 мА/см² до 362,4 г/л при плотности тока 60 мА/см².

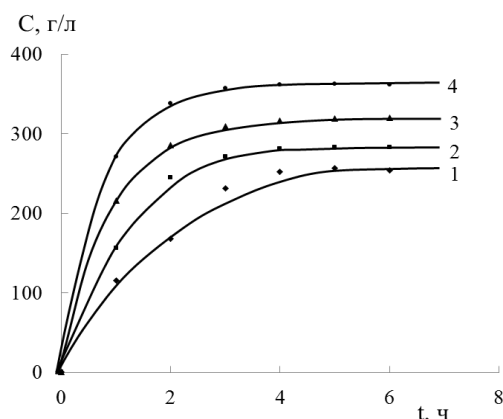


Рис. 5. Зависимость концентрации NaOH от времени. Плотность тока, мА/см² 1 - 30; 2 - 40; 3 - 50; 4 - 60
Fig. 5. The dependence of the concentration of NaOH on time. Current density, mA/cm² 1 - 30; 2 - 40; 3 - 50; 4 - 60

Для оценки выхода по току и затрат электроэнергии на переработку сточной воды была поставлена серия балансовых опытов, в процессе которых через электролизер пропускать определенное количество электричества. Вся щелочь, образующаяся в аппарате, собиралась в одну емкость. Раствор гидроокиси натрия и сточная вода подвергались анализу только один раз в конце опыта. В результате определялось количество генерируемой в процессе электролиза щелочи и количество карбоната и бикарбоната натрия, оставшихся в сточной воде. По разности количества карбоната и бикарбоната натрия в начале процесса и количества карбоната, бикарбоната и гидроокиси натрия в конце процесса определяли массу образующегося углекислого газа.

Таблица

Результаты балансовых опытов
Table. The results of balance experiments

Плотность тока, мА/см ²		30	40	50	60
Количество пропущенного электричества, А·ч		82,4	82,4	68,8	61,8
Загружено, г	Na ₂ CO ₃	70,5	70,5	70,5	70,5
	NaHCO ₃	121,2	121,2	121,2	121,2
	NaOH	1,2	1,2	1,2	1,2
Выгружено, г	Na ₂ CO ₃	0	0	0	0
	NaHCO ₃	67,5	73,6	103,7	118,9
	NaOH	78,8	76,1	60,5	52,5
	CO ₂	45,4	42,0	27,5	20,3
Выход по току NaOH, %		64,1	61,9	58,9	56,9
Затраты электроэнергии на получение 1 кг NaOH кВт·ч/кг		2,22	3,30	4,61	5,87

Количество воды, переносимой из анодной камеры в катодную, и количество водорода и кислорода, выделяющихся на электродах, не учитывалось. Объем сточной воды в этой серии опытов составлял величину 3 л. Результаты этих экспериментов представлены в таблице.

С увеличением мембранной плотности тока от 30 мА/см² до 60 мА/см² выход по току понижается от 64,1% до 56,9%. Одновременно происходит рост удельных затрат электроэнергии на получение гидроокиси натрия от 2,22 кВт·ч/кг до 5,87 кВт·ч/кг.

ВЫВОДЫ

Таким образом, результаты исследования показали, что сточные воды, образующиеся в процессе получения очищенного бикарбоната натрия, содержат около 24 г/л карбоната натрия и около 40 г/л бикарбоната натрия. Перед сбросом этот сток необходимо подвергать многократному разбавлению. Вместе с тем, переработка такой сточной воды в мембранном электролизере позволяет не только производить очистку стока, но и получать вещества, которые можно использовать в производственных процессах. Так при обработке 1 м³ сточной воды возможно производство до 72 л гидроокиси натрия с концентрацией 360 г/л и до 15 кг углекислого газа. После электролизной переработки в сточной воде содержится только бикарбонат натрия с концентрацией около 3,6 г/л.

Исследование выполнено за счет гранта Российской научной фонды (проект № 21-79-30029).

The study has been supported by grant of the Russian Science Foundation (project 21-79-30029).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Подобед О.В.** Бикарбонат натрия как нефропротективная терапия при хронической болезни почек. *Военная медицина*. 2015. № 1(34). С. 122-127.
2. **Подобед О.В.** О применении бикарбоната натрия при хронической болезни почек: новые возможности для нефропротективной терапии. Уратный нефролитиаз и сода. *Лечебное дело*. 2015. № 6(46). С. 65-75.
3. **Чой Е.Д., Ли В.В., Туркменов А.М., Деркембаева Ж.С., Жолборсов А.А., Джураева С.Д., Туркменов А.А.** Терапевтические свойства бикарбоната натрия (Обзор литературы). *Урал. Мед. журн.* 2020. № 8 (191). С.55-60.
4. **Толстова Е.Г.** Исследование влияния состава химических разрыхлителей на щелочность мучных кондитерских изделий. *Вестн. Алтай. гос. аграр. ун-та*. 2015. № 3(125). С. 143-147.
5. **Собурь С.В.** Огнетушители. М.: ПожКнига. 2016. 80 с.
6. **Шарипов Х.Т., Шарифутдинов У.З.** Процесс бикарбонатного подземного выщелачивания урана из высококарбонатных руд. *Universum: Техн. науки*. 2016. № 9(30). С. 59-62.

REFERENCES

1. **Podobed O.V.** Sodium bicarbonate as a nephroprotective therapy for chronic kidney disease. *Voennaya Meditsina*. 2015. N 1(34). P. 122-127 (in Russian).
2. **Podobed O.V.** On the use of sodium bicarbonate in chronic kidney disease: new possibilities for nephroprotective therapy. Urate nephrolithiasis and soda. *Lechebnoe Delo*. 2015. N 6(46). P. 65-75 (in Russian).
3. **Choi E.D., Li V.V., Turkmenov A.M., Derkembayeva Zh.S., Zholborsov A.A., Dzhuraeva S.D., Turkmenov A.A.** Therapeutic properties of sodium bicarbonate (Literature review). *Ural. Med. Zhurn.* 2020. N 8 (191). P. 55-60 (in Russian).
4. **Tolstova E.G.** Study of the influence of the chemical baking powder composition on the flour confectionery alkalinity. *Vestn. Altay. Gos. Agrar. Univ.* 2015. N 3 (125). P. 143-147 (in Russian).
5. **Sobur S.V.** Fire extinguishers: Educational reference manual. M.: PozhKniga. 2016. 80 p. (in Russian).

7. **Бутман М.Ф., Филатова Н.В., Козловская Г.П.** Комплексный разжижитель на основе соды, жидкого стекла и оксизтилендифосфоновой кислоты в технологии керамического литья. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2020. Т. 63. Вып. 7. С. 31-40. DOI: 10.6060/ivkkt.20206307.6166.
8. **Рабинович В.А., Хавин З.Я.** Краткий химический справочник. Л.: Химия. 1991. 432 с.
9. **Лидин Р.А., Андреева Л.Л., Молочко В.А.** Константы неорганических веществ: справочник. М.: Дрофа. 2008. 685 с.
10. **Ткач Г.А., Шапоров В.П., Титов В.М.** Производство соды по малоотходной технологии. Харьков: Изд-во ХГПУ. 1998. 429 с.
11. **Шатов А.А.** Производство кальцинированной соды - от прошлых к новым технологиям. Научное обозрение. *Фунд. и приклад. исслед.* 2017. № 1. URL: <http://www.scientificreview.ru/ru/article/view?id=8> (дата обращения: 8.05.2020).
12. **Ghanbari Maharloo D., Ali Darvishi, Razieh Davand, Majid Saidi, Mohammad Reza Rahimpour.** Process intensification and environmental consideration of sodium bicarbonate production in an industrial soda ash bubble column reactor by CO₂ recycling. *J. CO₂ Utilization*. 2017. V. 20. P. 318-327. DOI: 10.1016/j.jcou.2017.06.005.
13. **Haut B., Halloin V., Cartage T., Cockx A.** Production of sodium bicarbonate in industrial bubble columns. *Chem. Eng. Sci.* 2004. V. 59. P. 5687-5694. DOI: 10.1016/j.ces.2004.07.110.
14. **Nidheesh P.V., Abhijeet Kumar, Syam Babu D., Jaimy Scaria, Suresh Kumar M.** Treatment of mixed industrial wastewater by electrocoagulation and indirect electrochemical oxidation. *Chemosphere*. 2020. V. 251. P. 126437. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.126437.
15. **Bykovsky N.A., Rahman P.A., Puchkova L.N., Fanakova N.N.** Electrochemical Recycling of Still Waste Liquid in Ammonia Soda Production. *Key Eng. Mater.* 2017. V. 743. P. 342-346. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.743.342.
16. **Мешалкин В.П., Шулаев Н.С., Быковский Н.А., Аристов В.М.** Физико-химические основы комбинированной энергоресурсоэффективной технологии переработки стоков производства кальцинированной соды. *Докл. РАН. Химия, науки о материалах*. 2020. Т. 494. С. 40-44. DOI: 10.31857/S268695352005009X.
17. **Быковский Н.А., Кантор Е.А., Малкова М.А., Пучкова Л.Н., Фанакова Н.Н.** Сточные воды производства изделий из титана – сырье для получения Ti(OH)₄, NaOH и HCl. *Экология и пром-сть России*. 2021. Т. 25. № 2. С. 8-11. DOI: 10.18412/1816-0395-2021-2-8-11.
18. **Bykovsky N.A., Kantor E.A., Rahman P.A., Puchkova L.N., Fanakova N.N.** Trivalent chromium wastewater treatment. *IOP Conf. Ser.: Earth and Environ. Sci.* 2020. V. 775 (1). P. 012085. DOI: 10.1088/1757-899X/775/1/012085.
19. **Bykovsky N.A., Kantor E.A., Rahman P.A., Puchkova L.N., Fanakova N.N.** Wastewater from the regeneration of cation-exchange filters for water treatment. *IOP Conf. Ser.: Earth and Environ. Sci.* 2020. V. 775 (1). P. 012084. DOI: 10.1088/1757-899X/775/1/012084.
20. **Bykovsky N.A., Kantor E.A., Rahman P.A., Puchkova L.N., Fanakova N.N.** Electrochemical treatment of waste water from nickel in galvanic production. *IOP Conf. Ser.: Earth and Environ. Sci.* 2019. V. 350 (1). P. 012029. DOI: 10.1088/1755-1315/350/1/012029.
6. **Sharipov Kh.T., Sharafutdinov U.Z.** The process of bicarbonate underground leaching of uranium from high-carbonate ores. *Universum: Tekhn. Nauki*. 2016. N 9(30). P. 59-62 (in Russian).
7. **Butman M.F., Filatova N.V., Kozlovskaya G.P.** Complex deflocculent based on soda, liquid glass and oxyethylidenediphosphonic acid in ceramic casting technology. *Chem-ChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2020. V. 63. N 7. P. 31-40 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20206307.6166.
8. **Rabinovich V.A., Khavin Z.Ya.** A short chemical reference book. L.: Khimiya. 1991. 432 p. (in Russian).
9. **Lidin R.A., Andreeva L.L., Molochko V.A.** Constants of inorganic substances: a reference book. M.: Drofa. 2008. 432 p. (in Russian).
10. **Tkach G.A., Shaporev V.P., Titov V.M.** Low-waste soda production. Kharkov: Publishing house KSPU. 1998. 429 p. (in Russian).
11. **Shatov A.A.** Soda ash production - from the past to new technologies. *Scientific Review. Fund. Priklad. Issl.* 2017. N 1. URL: <http://www.scientificreview.ru/ru/article/view?id=8> (date of the application: 8.05.2020). (in Russian).
12. **Ghanbari Maharloo D., Ali Darvishi, Razieh Davand, Majid Saidi, Mohammad Reza Rahimpour.** Process intensification and environmental consideration of sodium bicarbonate production in an industrial soda ash bubble column reactor by CO₂ recycling. *J. CO₂ Utilization*. 2017. V. 20. P. 318-327. DOI: 10.1016/j.jcou.2017.06.005.
13. **Haut B., Halloin V., Cartage T., Cockx A.** Production of sodium bicarbonate in industrial bubble columns. *Chem. Eng. Sci.* 2004. V. 59. P. 5687-5694. DOI: 10.1016/j.ces.2004.07.110.
14. **Nidheesh P.V., Abhijeet Kumar, Syam Babu D., Jaimy Scaria, Suresh Kumar M.** Treatment of mixed industrial wastewater by electrocoagulation and indirect electrochemical oxidation. *Chemosphere*. 2020. V. 251. P. 126437. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.126437.
15. **Bykovsky N.A., Rahman P.A., Puchkova L.N., Fanakova N.N.** Electrochemical Recycling of Still Waste Liquid in Ammonia Soda Production. *Key Eng. Mater.* 2017. V. 743. P. 342-346. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.743.342.
16. **Meshalkin V.P., Shulaev, N.S., Bykovsky N.A., Aristov V.M.** Physicochemical Foundations of an Energy and Resource Efficient Combined Technology for Processing of Soda Ash Production Wastewater. *Doklady Chem.* 2020. V. 494. P. 145-148. DOI: 10.1134/S0012500820090025.
17. **Bykovsky N.A., Kantor E.A., Malkova M.A., Puchkova L.N., Fanakova T.S.** Wastewater from the production of titanium products as a raw material for the Ti(OH)₄, NaOH and HCl production. *Ecologiya Prom-st' Rossii*. 2021. V. 25. N 2. P. 8-11. DOI: 10.18412/1816-0395-2021-2-8-11.
18. **Bykovsky N.A., Kantor E.A., Rahman P.A., Puchkova L.N., Fanakova N.N.** Trivalent chromium wastewater treatment. *IOP Conf. Ser.: Earth and Environ. Sci.* 2020. V. 775 (1). P. 012085. DOI: 10.1088/1757-899X/775/1/012085.
19. **Bykovsky N.A., Kantor E.A., Rahman P.A., Puchkova L.N., Fanakova N.N.** Wastewater from the regeneration of cation-exchange filters for water treatment. *IOP Conf. Ser.: Earth and Environ. Sci.* 2020. V. 775 (1). P. 012084. DOI: 10.1088/1757-899X/775/1/012084.
20. **Bykovsky N.A., Kantor E.A., Rahman P.A., Puchkova L.N., Fanakova N.N.** Electrochemical treatment of waste water from nickel in galvanic production. *IOP Conf. Ser.: Earth and Environ. Sci.* 2019. V. 350 (1). P. 012029. DOI: 10.1088/1755-1315/350/1/012029.

21. **Кругликов С.С.** Применение электромембранных процессов для стабилизации и регулирования состава растворов в электролизерах. *Гальванотехника и обработка пов-сти*. 2018. Т. 26. № 2. С. 41-47. DOI: 10.47188/0869-5326_2018_26_2_41.
22. **Винокуров Е.Г., Мешалкин В.П., Василенко Е.А., Невмятуллина Х.А., Бурухина Т.Ф., Бондарь В.В.** Системный анализ эффективности и конкурентоспособности технологий хромирования. *Теор. основы хим. технологии*. 2016. Т. 50. № 5. С. 551–560. DOI:10.7868/S0040357116050122.
23. **Козадерова О.А., Нифталиев С.И., Ким К.Б.** Применение биполярных мембран МБ-2, модифицированных гидроксидом хрома (III), для конверсии сульфата натрия. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2019. Т. 62. Вып. 3. С. 30-36. DOI: 10.6060/ivkkt201962fp.5811.
24. **Шестаков К.В., Лазарев С.И., Полянский К.К.** Исследование кинетических и структурных характеристик мембран в процессе электродиализной очистки медьсодержащих растворов. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2019. Т. 62. Вып. 7. С. 65-71. DOI: 10.6060/ivkkt.20196207.5827.
25. **Кузнецов В.В., Ефремова Е.Н., Филатова Е.А., Пирогов А.В.** Электрохимическая очистка сточных вод, содержащих азобензол. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2016. Т. 59. Вып. 12. С. 118-126. DOI: 10.6060/tcct.20165912.5422.
26. **Лазарев С.И., Ковалева О.А., Попов Р.В., Ковалев С.В., Игнатов Н.Н.** Электромембранная очистка сточных вод химических производств от ионов Cr^{6+} , Zn^{2+} , SO_4^{2-} , Cl^- . *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2018. Т. 61. Вып. 4-5. С. 119-125. DOI: 10.6060/tcct.20186104-05.5602.
27. **Хорохорина И.В., Лазарев С.И., Головин Ю.М., Лазарев Д.С.** Структурные характеристики мембран и кинетические зависимости электронанофильтрационной очистки сточных вод процесса латунирования. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2020. Т. 63. Вып. 7. С. 95-102. DOI: 10.6060/ivkkt.20206307.6117.
21. **Kruglikov S.S.** Application of Electromembrane Processes for the Stabilization and Control of Process Solutions in Electrolytic Cells. *Galvanotekhnika Obrabotka Pov-sti*. 2018. V. 26. N 2. P. 41-47 (in Russian). DOI: 10.47188/0869-5326_2018_26_2_41.
22. **Vinokurov E.G., Meshalkin V.P., Vasilenko E.A., Nevmyatullina H.A., Burukhina T.F., Bondar V.V.** Systematic analysis of the efficiency and competitiveness of chromium plating technologies. *Teor. Osnovy Khim. Tekhnol.* 2016. V. 50. N 5. P. 551–560 (in Russian). DOI: 10.7868/S0040357116050122.
23. **Kozaderova O.A., Niftaliyev S. I., Kim K.B.** Application of bipolar membranes MB-2 modified by chromium (III) hydroxide for sodium sulfate conversion process. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2019. V. 62. N 3. P. 30-36 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt201962fp.5811.
24. **Shestakov K.V, Lazarev S.I., Polyanskiy K.K.** Study of kinetic and structural characteristics of membranes in purification process of copper-containing solutions by electro dialysis. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2019. V. 62. N 7. P. 65-71 (in Russian). DOI:10.6060/ivkkt.20196207.5827.
25. **Kuznetsov V.V., Efremova E.N., Filatova E.A., Pirogov A.V.** Electrochemical purification of wastewaters containing azobenzene. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2016. V. 59. N 12. P. 118-126 (in Russian). DOI: 10.6060/tcct.20165912.5422.
26. **Lazarev S.I., Kovaleva O.A., Popov R.V., Kovalev S.V., Ignatov N.N.** Electromembrane purification of waste water of chemical production from ions Cr^{6+} , Zn^{2+} , SO_4^{2-} , Cl^- . *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2018. V. 61. N 4-5. P. 119-125 (in Russian). DOI: 10.6060/tcct.20186104-05.5602.
27. **Khorokhorina I.V., Lazarev S.I., Golovin Yu.M., Lazarev D.S.** Structural characteristics of membranes and kinetic dependences of electronanofiltration waste water treatment of latinating process. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2020. V. 63. N 7. P. 95-102 (in Russian). DOI:10.6060/ivkkt.20206307.6117.

Поступила в редакцию 12.05.2021
Принята к опубликованию 10.06.2021

Received 12.05.2021
Accepted 10.06.2021