ПЕРЕРАБОТКА ПОДШЛАМОВЫХ ВОД ГЛИНОЗЕМНОГО ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕКТРОДИАЛИЗОМ

[1]Н.В. Васюнина, [1]И.В. Дубова, [2]К.Е. Дружинин, [1]Т.Р. Гильманшина

[1]Сибирский федеральный университет, г. Красноярск,
[2]ООО "Индаст-ПРО", г. Красноярск

Проанализирована возможность применения электродиализа для переработки слабых алюминатных растворов (подшламовой воды) с целью их концентрирования и каустификации. Для проведения испытаний применялась трехкамерная электродиализная ячейка с гетерогенными катионообменными мембранами МК-40. Определены оптимальные режимные параметры процесса: межполюсное расстояние 3–4 см и плотность тока 2 А/дм^2 при рабочем напряжении на ячейке 20–26 В. Установлены удельный расход электроэнергии 9,7–20,6 кВт·ч/кг щелочи, эффективность каустификации 56,1–69,6 %, выход щелочи – 81 %.

Ключевые слова: электродиализ, подшламовые воды, концентрирование щелочных растворов, электродиализная ячейка, алюминатные растворы, кинетика концентрирования электродиализом

Статья поступила в редакцию 13.11.2023, доработана 26.03.2024, принята к публикации 18.07.2024

Processing of Sludge Water from Alumina Production by Electrodialysis

[1]N.V. Vasiunina, [1]I.V. Dubova, [2]K.E. Druzhinin, [1]T.R. Ghilmanshina

[1]Siberian Federal University, 660041 Krasnoyarsk, Russia,
[2]Indast-PRO LLC, 660025 Krasnoyarsk, Russia

The possibility of using the electrodialysis for processing weak aluminate solutions (sludge water) for the purpose of their concentration and causticization is analyzed. For testing, a three-chamber electro-dialysis cell with heterogeneous cation exchange membranes MK-40 was used. The optimal operating parameters of the process were determined, as follows: pole-to-pole distance 3–4 cm and current density 2 A/dm^2 at the operating voltage on the cell of 20–26 V. Specific electricity consumption was established as 9.7–20.6 kWh/kg alkali, causticization efficiency 56.1–69.6%, alkali yield – 81%.

Keywords: electro-dialysis, sludge water, concentration of alkaline solutions, electro-dialysis cell, aluminate solutions, kinetics of concentration by electro-dialysis

Received 13.11.2023, revised 26.03.2024, accepted for publication 18.07.2024

DOI: 10.18412/1816-0395-2024-11-28-32

Производство глинозема характеризуется большими материальными потоками, высоким потреблением электроэнергии и неблагоприятным воздействием на окружающую среду. В глиноземном производстве образуются большие объемы растворов — подшламовых вод, отработанных газоочистных растворов и других щелочных растворов слабой концентрации, которые требуют либо утилизации, либо вовлечения в производство. Большое количество таких растворов представляет опасность для экологической обстановки в районе производства [1]. Комплексная переработка исходного сырья и промпродуктов, уменьшение расхода энергии и улучшение экологической обстановки на предприятиях связаны с требованиями снижения эмиссии парниковых газов и расхода сточных вод согласно ISO-14001. В этих условиях крайне важно разрабатывать экологически чистые методы промышленной переработки. Электродиализ (ЭД) благодаря селективности, высокой эффективности переработки сточных вод без использования дополнительных химических реагентов может принести значительные экологические выгоды [2–5].

На сегодняшний день основными способами промышленного получения глинозема являются способы Байера, спекания и разные их комбинации, суть которых сводится к растворению богатых глиноземом минералов, например боксита в концентрированном растворе гидроксида натрия (NaOH) при высокой температуре, в ходе которого большая часть алюминийсодержащих частиц растворяется в виде алюмината натрия ($NaAl(OH)_4$) [6]:

разложение бокситов $Al(OH)_{3тв} + NaOH_{р\text{-}р} \rightarrow NaAl(OH)_{4р\text{-}р}$. (1)

После отделения нерастворимого остатка щелочной раствор глинозема, содержащий $NaAl(OH)_4$ и NaOH, охлаждают и осаждают гидроксид алюминия (гиббсит, $Al(OH)_3$):

осаждение гиббсита $NaAl(OH)_{4р\text{-}р} \rightarrow Al(OH)_3\downarrow + NaOH_{р\text{-}р}$; (2)

кальцинация $Al(OH)_3\downarrow \rightarrow$ $\rightarrow Al_2O_3\downarrow + 3H_2O$. (3)

В результате протекания реакций (1–3) с последующей фильтрацией пульпы образуются алюминатный раствор, направляемый далее на операции разложения (декомпозиции) с осаждением $Al(OH)_3$, и шламы, которые после промывки от щелочи горячей подшламовой водой в сгустителях фильтруются, репульпируются холодной подшламовой водой и откачиваются на шламовые поля. Жидкая фаза пульпы отвального шлама (подшламовая вода), образующаяся в большом количестве, после отстаивания на шламовом поле системами водозабора подается к насосной станции и возвращается в технологический процесс.

На АО "Русал Ачинск" подшламовую воду используют в качестве газоочистного раствора на системах очистки отходящих газов печей спекания, что способствует снижению выбросов углекислого газа и диоксида серы, уменьшению потоков подшламовой воды и их концентрированию [7]. Однако в результате использования подшламовой воды в качестве газоочистного раствора на печах спекания происходит фактически карбонизация этих растворов и процент соды в растворе на выходе из газоочистной установки увеличивается более чем в два раза.

Щелочные малоконцентрированные растворы с целью их концентрирования могут подвергаться выпарке. Выпарка относится к процессам, требующим большого расхода энергии, особенно для низкоконцентрированных растворов. В растворах переработки глинозема по способу Байер-спекание особенно много карбонатной щелочи, которая при выпарке так и остается в уже сконцентрированном растворе карбонатной.

Внедрение технологии ЭД позволит уменьшить продолжительность процесса декомпозиции алюминатного раствора, приведет к значительному экономическому эффекту и росту общей производительности глиноземного предприятия, кроме того получение из таких растворов концентрированной каустической щелочи и осадка — гидроксида алюминия — позволило бы получить дополнительную прибыль [6, 8–10]. Применение ЭД для переработки щелочных алюминатных растворов

Таблица 1. Состав подшламовых вод АО "Ачинский глиноземный комбинат", г/л

Table 1. Composition of the pond liquor water of JSC Achinsk Alumina Refinery, g/l

Содержание	На входе в ГОУ	На выходе из ГОУ	Проба
Щелочь:			
общая	17–22	17–22	18,15
каустическая $Na_2O_{(ку)}$	10,0–11,8	3,7–9,0	8,15
Сода*	35–40	55–75	55
Оксид алюминия Al_2O_3	1,8–2,1	1,7–1,9	1,7

*В %.

экономически целесообразнее, чем использование других мембранных методов. При ЭД концентрировании карбонатная щелочь переходит в каустическую, так как из анодной камеры в катодную переходят только ионы Na^+. При этом идет электрохимическое разложение воды с выделением на катоде водорода

$H^+ + e = 1/2H_2$,

а на аноде выделение кислорода

$4OH^- - 4e = O_2 + 2H_2O$.

Для щелочных растворов с концентрацией менее 10 г/л процесс ЭД практически не имеет равных по стоимости переработки, отнесенной к 1 м^3 раствора. При этом коэффициент использования электроэнергии при ЭД в среднем составляет не менее 70 %.

Разложение алюминатных растворов с высоким содержанием общей щелочи 116 г/л, каустической щелочи 97,6 г/л, Al_2O_3 — 94,2 г/л с использованием ЭД рассмотрено в работах [11–13], получены кинетические кривые разложения и показана возможность концентрирования растворов до 150 г/л и выше при сохранении скорости концентрирования. Для концентрирования слабощелочных алюминатных растворов с содержанием каустической щелочи 17,2 г/л определена оптимальная плотность тока 3,50–4,00 А/дм^2 [11]. Применение ЭД совместно с аэрационной отмывкой от красного шлама предложено авторами работы [2]. Добавление аэрации позволило улучшить отделение OH^- от нерастворимого осадка, повысило эффективность извлечения NaOH в раствор и отделение $NaAl(OH)_4$ из щелочного раствора. Кроме того, аэрация уменьшила загрязнение мембраны и за счет этого снизила энергопотребление электродиализной системы.

Разделение щелочного алюминатного раствора, содержащего NaOH и $NaAl(OH)_4$, с использованием ЭД исследовано авторами работы [14]. Авторы пришли к выводу, что для достижения высокой и долгосрочной эффективности разделения необходимы мембраны с более высокой стабильностью и селективностью.

В работе [14] для отделения NaOH от раствора алюмината натрия предложено объединение ЭД и электроэлектродиализ (ЭЭД). Электроэлектродиализ представляет собой комбинацию электролиза и электродиализа с катионно- или анионообменной мембраной. Сочетание ЭД и ЭЭД может обеспечить как высокую эффективность очистки, так и низкую утечку $Al(OH)_4^-$, а также низкое потребление энергии.

Таким образом, многочисленные исследования по декомпозиции алюминатных растворов показывают направления поиска условий для повышения эффективности процесса, включая выбор мембран, совмещение процессов, изменение режимов. В то же время все проводимые исследования демонстрируют зависимость параметров процесса концентрирования и разделения от состава исходных щелочных алюминатных растворов, т.е. на данном этапе для внедрения процесса ЭД для переработки сточных вод необходимо проводить исследования для каждого конкретного производства.

Цель работы — выявление оптимальных параметров ЭД слабощелочной подшламовой воды, отобранной на выходе из газоочистной установки (ГОУ) печи спекания АО "Русал Ачинск", получение зависимостей по концентрированию алюминатных растворов ЭД по каустической и карбонатной щелочи.

Материалы и методы

Исследования по концентрированию алюминатных растворов электродиализом проводились на подшламовой воде АО "Русал

Таблица 2. Режимные параметры процесса электродиализа
Table 2. Process mode parameters of electrodialysis

Управляемые параметры процесса		Контролируемые в ходе эксперимента параметры
Параметр	Значение	
Плотность тока, А/см^2	0,5–3,0	$Na_2O_{каust.}$
Межполюсное расстояние, МПР, см	3–5	$Na_2O_{общ.}$
Продолжительность процесса, мин	15–120	$Na_2O_{карб.}$

Ачинск", усредненный состав которых приведен в табл. 1.

Плотность исходной подшламовой воды (ПШВ) при 25 °С составила 1,065 г/см^3, удельная электропроводность — 0,295 См/см.

Исследования проводили в лабораторных условиях на ЭД установке, имеющей две диафрагменные перегородки, которые разделяют ячейку на три камеры (рис. 1, *а*). Размеры ячейки 220×115×100 мм. В качестве источника постоянного тока использовался линейный источник АКИП-1115, оснащенный цифровой индикацией силы тока и напряжения. Источник питания позволяет проводить эксперименты при силе тока от 0 до 60 А и настраивать как силу тока, так и напряжение. В качестве материала катода и анода использован титановый сплав ВТ1-0. Площадь поверхности электродов — 195 см^2. Во внешних камерах установлены аноды, во внутренней камере — катод (рис. 1, *б*). Интервал изменения межполюсного расстояния 3−5 см, плотности тока — 0,5−3,0 А/дм^2.

В процессе электродиализа через каждые 15 мин отбирали пробы для анализа, проводили замер температуры. Отобранные пробы анализировали на общую, каустическую и карбонатную щелочность согласно ГОСТ 31957, содержание оксида алюминия ГОСТ 2642.4-97. Исследуемые режимные параметры представлены в табл. 2.

Результаты и обсуждение

В ходе исследований было проанализировано влияние плотности тока и МПР на степень каустификации и концентрирования растворов. При уменьшении плотности тока менее 1 А/дм^2 процесс фактически не идет, при этом скорость перехода ионов Na^+ из анодной камеры в катодную слишком низка при любом выбранном МПР.

Очевидно, что для увеличения полноты концентрирования необходимо увеличение плотности тока и уменьшение толщины диффузионного пограничного слоя. Однако при плотности тока, равной 3 А/дм^2, особенно при большом МПР, равном 5 см, в процессе электродиализа наблюдается сильное вспенивание раствора в анодной камере, происходит резкий рост рабочего напряжения на ячейке (через 40 мин от начала электродиализа рабочее напряжение на ячейке поднимается выше 30 В), как следствие, температура раствора к концу процесса поднимается выше 85 °С (при начальной температуре 22,3 °С). Сильный нагрев раствора при плотности тока 3 А/дм^2 снижает сроки работы мембран, ведет к перерасходу электроэнергии и избыточному испарению воды с открытой поверхности, что серьезно усложняет технологию.

Таким образом, при данных условиях электродиализа плотность тока, равная 3 А/дм^2, фактически приближается к предельной. Известно, что ограничение плотности тока при электродиализе связано с явлением концентрационной поляризации, возникающей на ионитных мембранах. Суть этого явления заключается в том, что движение ионов через мембрану под действием электрического тока идет быстрее, чем в растворе, что приводит к падению концентрации около принимающей стороны мембраны и к повышению концентрации около отдающей стороны. Существует такая плотность тока, называемая предельной, при которой концентрация переносимого иона около принимающей стороны мембраны снижается до 0 и начинается перенос ионов H^+ и OH^-, образовавшихся при электролизе воды. Этот процесс вызывает перерасход электроэнергии, не снижая солесодержания воды, и приводит к изменению pH среды, что может вызвать образование осадков на мембранах. Возможно некоторое повышение значения рабочей плотности тока выше предельного значения, если применить технологии реверсивного и импульсного ЭД, что существенно снизит ограничения, связанные с опасностью осадкообразования в процессе электродиализа.

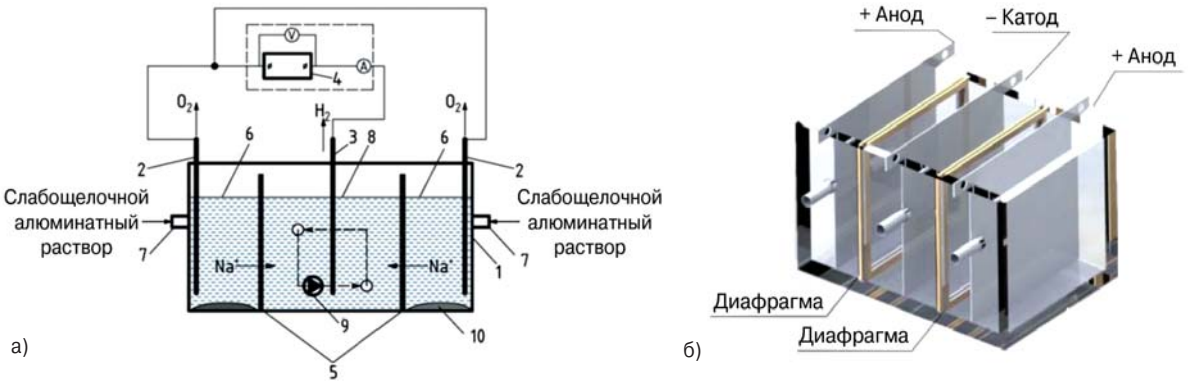

Рис. 1. Схема ЭД установки (*а*) и 3d-модель (*б*) электродиализной ячейки и ее подключения:
1 – электродиализная ячейка; *2* – аноды; *3* – катод; *4* – источник тока; *5* – диафрагменные перегородки с катионообменными мембранами; *6* – анодные камеры; *7* – патрубки; *8* – катодная камера; *9* – перистальтический насос; *10* – анодный шлам

Fig. 1. Diagram of the ED unit (*a*) and 3D model (*b*) of the electrodialysis cell and its connections:
1 – electrodialysis cell; *2* – anodes; *3* – cathode; *4* – current source; *5* – diaphragm partitions with cation exchange membranes; *6* – anode chambers; *7* – pipes; *8* – cathode chamber; *9* – peristaltic pump; *10* – anode sludge

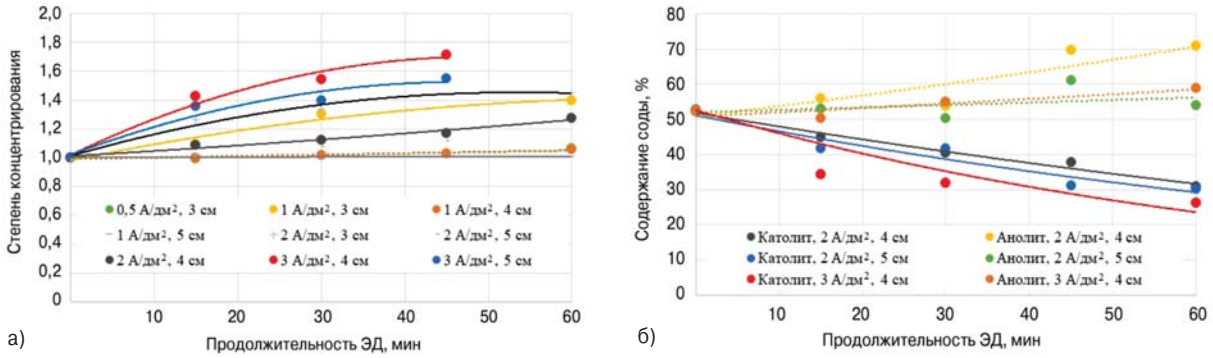

Рис. 2. Зависимость степени концентрирования (*а*) и содержания соды (*б*) в анодной и катодной зонах от продолжительности ЭД при разных параметрах процесса

Fig. 2. Dependence of the degree of concentration (*a*) and soda content (*b*) in the anode and cathode zones on the ED duration at various process parameters

Таблица 3. Параметры процесса ЭД

Table 3. ED process parameters

Плотность тока, А/дм²	МПР, см	Температура, °С	Продолжительность процесса, мин	Рабочее напряжение, В	Степень концентрирования общей щелочности в катодной камере, %	Содержание соды, %	Эффективность каустификаци, %	Выход щелочи, %	Удельный расход электроэнергии, кВт·ч/кг щелочи
0,5	3	30	120	10,3	1,11	42,0	30,3	26,4	5,2
1,0	3	50	60	15	1,40	26,0	58,4	58,1	4,1
	4	62	60	16	1,08	52,4	5,6	28,7	28,7
	5	62	60	16,5	1,03	51,1	4,3	1,2	247,3
2,0	3	70	60	20,0	1,45	21,2	69,6	80,9	9,7
	4	74	60	26,0	1,28	20,7	56,1	81,4	20,9
	5	77	60	29,0	1,20	40,6	23,4	40,8	26,0
3,0	4	Выше 85	45	Свыше 30	1,34	18,0	69,6	86,7	12,5
	5	Выше 85	45	Свыше 30	1,55	18,2	52,7	50,11	13,6

При уменьшении межполюсного расстояния менее 3 см в анодной и катодной зонах образуются застойные области раствора с большой концентрацией и вязкостью, увеличивается толщина диффузионного пограничного слоя, что резко повышает величину катодной поляризации и усложняет ведение процесса. При увеличении межполюсного расстояния выше 5 см вследствие низкой удельной электропроводности слабощелочных растворов наблюдается чрезмерное падение напряжения в межполюсном пространстве, что, как следствие, приводит к резкому росту температуры электролита (выше 80 °С) и повышению расхода электроэнергии.

Рабочее напряжение на ячейке увеличивается в течение всего эксперимента вследствие постепенного роста диффузионных ограничений и доходит до 30 В и выше (предельное выходное напряжение на используемом источнике тока).

Степень концентрирования общей щелочи в растворе при выбранных режимных параметрах процесса монотонно возрастает и через 60 мин доходит до 1,40–1,45 (рис. 2, *а*).Содержание соды в растворе в процессе электродиализа в течение часа снижается с 55 до 25–30 % при плотности тока 2–3 А/дм² (рис. 2, *б*).

На основе расчета материального баланса определены основные показатели процесса (табл. 3).

По результатам исследования полученный щелочной раствор содержит, г/л: 23,23 — общей щелочи; 18,33 — каустической щелочи; 4,78 — карбонатной щелочи (20,7 % соды); 1,7 — Al_2O_3.

Степень концентрирования подшламовой воды составила по общей щелочности — 1,28, каустической — 2,25, содержание соды снизилось на 28,9 %. Эффективность каустификации составила 56 %, выход по току — 81,5 %, удельный расход электроэнергии при этом равен 20,9 кВт·ч на кг щелочи, концентрированной в катодной камере. В процессе электродиализа произошло доразложение алюминатного раствора с выделением гидроксида алюминия в анодный шлам, что привело к снижению содержания Al_2O_3 в растворе, эффективность доразложения составила 10,5 %.

Выводы

В работе изучена возможность каустификации и концентрирования слабощелочных подшламовых вод глиноземного производства (с концентрацией общей щелочи менее 20 г/л) методом ЭД. Оптимальными режимными параметрами ЭД являются: плотность тока 2 А/дм² при МПР, составляющем 3–4 см. Рабочее напряжение на ячейке при данных режимных параметрах устанавливается на уровне 20–26 В, при этом удельный расход электроэнергии составляет 9,7–20,6 кВт·ч/кг щелочи, эффективность каустификации — 56,1–69,6 %, выход щелочи — ≈81 %. Таким образом, переработка подшламовых вод электродиализом увеличит эффективность их использования в технологическом процессе за счет повышения концентрации каустической щелочи и снижения карбонатной. Все это приведет к уменьшению объемов сливов (в среднем 1,3–1,5 раза) на шламовые поля и улучшит экологическую обстановку вокруг предприятия по переработке глинозема.

Литература

1. **Шепелев И.И., Пиляева О.В., Еськова Е.Н., Кирюшин Е.В.** Внедрение экологических мероприятий с целью снижения воздействия глиноземного производства на состояние природной среды. Проблемы региональной экологии. 2021. № 3. С. 10–14.

2. **Zhang Y., Shi Q., Luo M., Wang H., Qi X., C.-H. Hou, Li F., Ai Z.,Araruna Junior J.T.** Improved bauxite residue dealkalization by combination of aerated washing and electrodialysi. J. Hazard. Mater. 2019. Vol. 364. P. 682–690.

3. **Hu B., Mu Z.D.** Treatment of wastewater from alumina plant by electrodialysis. IOP Conf. Ser.: Earth Env. Sci. 2019. Vol. 295(3). P. 1–6. https://doi.org/10.1088/1755-1315/295/3/032090

4. **Gurreri L., Tamburini A., Cipollina A., Micale G.** Electrodialysis applications in wastewater treatment for environmental protection and resources recovery. A systematic review on progress and perspectives. Membranes. 2020. Vol. 10. No. 7. P. 146.

5. **Sedighi M., Usefi M.M.B., Ismail A.F., Ghasemi M.** Environmental sustainability and ions removal through electrodialysis desalination: Operating conditions and process parameters. Desalination. 2023. Vol. 549. P. 116319.

6. **Yan H., Wu C., Wu Y.** Separation of alumina alkaline solution by electrodialysis: Membrane stack configuration optimization and repeated batch experiments,. Separation and Purification Technology. 2015. Vol. 139. P. 78–87. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2014.11.004.

7. **Дружинин К.Е., Васюнина Н.В., Немчинова Н.В., Гильманшина Т.Р.** Очистка отходящих газов печей спекания с использованием подшламовой воды в качестве газоочистного раствора. Экология и промышленность России. 2020. Т. 24. № 3. С. 4–9.

8. **Strathmann H.** Electrodialysis, a mature technology with a multitude of new applications, Desalination. 2010 Vol. 264. P. 268–288.

9. **Hu B., Mu Z.D.** Treatment of wastewater from alumina plant by electrodialysis. IOP Conf. Ser.: Earth Env. Sci. 2019. Vol. 295(3). P. 1–6. https://doi.org/10.1088/1755-1315/295/3/032090.

10. **Haydarov A.A., Alyshanly G.I., Kuliyev S.A., Mehmet D.T.** Obtaining of alkaline from aluminate solution by electrodialysis method. Azerbaijan Chemical Journal. 2023. №. 2. P. 154–162.

11. **Vetchinkina T.N., Tuzhilin A.S., Balmaev B.G.** Decomposition and Concentration of Aluminate Solutions by Electrodialysis. Russian Metallurgy (Metally). 2022. Vol. 2022. No. 12. P. 1511–1517.

12. **Тодоров С.А., Лайнер Ю.А., Медведев А.С.** Утилизация низкоконцентрированных растворов с использованием электродиализа. Известия Высших учебных заведений. Цветная металлургия. 2004. № 3. С. 37–39.

13. **Lainer Y.A., Gorichev I.G., Todorov S.A.** Aluminum hydroxide nucleation kinetics and mechanism during the electrodialysis decomposition of aluminate solutions. Russian Metallurgy (Metally). 2008. Vol. 2008. P. 301–305.

14. **Yan H., Xue Sh., Wu C., Wu Y., Xu T.** Separation of NaOH and NaAl $(OH)_4$ in alumina alkaline solution through diffusion dialysis and electrodialysis. Journal of Membrane Science. 2014. Vol. 469. P. 436–446.

References

1. **Shepelev I.I., Pilyaeva O.V., Es'kova E.N., Kiryushin E.V.** Vnedrenie ekologicheskikh meropriyatii s tsel'yu snizheniya vozdeistviya glinozemnogo proizvodstva na sostoyanie prirodnoi sredy. Problemy regional'noi ekologii. 2021. № 3. S. 10–14.

2. **Zhang Y., Shi Q., Luo M., Wang H., Qi X., C.-H. Hou, Li F., Ai Z.,Araruna Junior J.T.** Improved bauxite residue dealkalization by combination of aerated washing and electrodialysi. J. Hazard. Mater. 2019. Vol. 364. P. 682–690.

3. **Hu B., Mu Z.D.** Treatment of wastewater from alumina plant by electrodialysis. IOP Conf. Ser.: Earth Env. Sci. 2019. Vol. 295(3). P. 1–6. https://doi.org/10.1088/1755-1315/295/3/032090

4. **Gurreri L., Tamburini A., Cipollina A., Micale G.** Electrodialysis applications in wastewater treatment for environmental protection and resources recovery. A systematic review on progress and perspectives. Membranes. 2020. Vol. 10. No. 7. P. 146.

5. **Sedighi M., Usefi M.M.B., Ismail A.F., Ghasemi M.** Environmental sustainability and ions removal through electrodialysis desalination: Operating conditions and process parameters. Desalination. 2023. Vol. 549. P. 116319.

6. **Yan H., Wu C., Wu Y.** Separation of alumina alkaline solution by electrodialysis: Membrane stack configuration optimization and repeated batch experiments,. Separation and Purification Technology. 2015. Vol. 139. P. 78–87. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2014.11.004.

7. **Druzhinin K.E., Vasyunina N.V., Nemchinova N.V., Gil'manshina T.R.** Ochistka otkhodyashchikh gazov pechei spekaniya s ispol'zovaniem podshlamovoi vody v kachestve gazoochistnogo rastvora. Ekologiya i promyshlennost' Rossii. 2020. T. 24. № 3. S. 4–9.

8. **Strathmann H.** Electrodialysis, a mature technology with a multitude of new applications, Desalination. 2010 Vol. 264. P. 268–288.

9. **Hu B., Mu Z.D.** Treatment of wastewater from alumina plant by electrodialysis. IOP Conf. Ser.: Earth Env. Sci. 2019. Vol. 295(3). P. 1–6. https://doi.org/10.1088/1755-1315/295/3/032090.

10. **Haydarov A.A., Alyshanly G.I., Kuliyev S.A., Mehmet D.T.** Obtaining of alkaline from aluminate solution by electrodialysis method. Azerbaijan Chemical Journal. 2023. №. 2. P. 154–162.

11. **Vetchinkina T.N., Tuzhilin A.S., Balmaev B.G.** Decomposition and Concentration of Aluminate Solutions by Electrodialysis. Russian Metallurgy (Metally). 2022. Vol. 2022. No. 12. P. 1511–1517.

12. **Todorov S.A., Lainer Yu.A., Medvedev A.S.** Utilizatsiya nizkokontsentrirovannykh rastvorov s ispol'zovaniem elektrodializa. Izvestiya Vysshikh uchebnykh zavedenii. Tsvetnaya metallurgiya. 2004. № 3. S. 37–39.

13. **Lainer Y.A., Gorichev I.G., Todorov S.A.** Aluminum hydroxide nucleation kinetics and mechanism during the electrodialysis decomposition of aluminate solutions. Russian Metallurgy (Metally). 2008. Vol. 2008. P. 301–305.

14. **Yan H., Xue Sh., Wu C., Wu Y., Xu T.** Separation of NaOH and NaAl $(OH)_4$ in alumina alkaline solution through diffusion dialysis and electrodialysis. Journal of Membrane Science. 2014. Vol. 469. P. 436–446.

Н.В. Васюнина – канд. техн. наук, доцент, Сибирский Федеральный университет (СФУ), e-mail: nvvasyunina@yandex.ru ● И.В. Дубова – канд. техн. наук, доцент, СФУ, e-mail: idubova@mail.ru ● К.Е. Дружинин – заместитель директора, ООО «Индаст-ПРО», e-mail: Bearget@mail.ru ● Т.Р. Гильманшина – канд. техн. наук., зав. кафедрой, СФУ, e-mail: gtr1977@gmail.com

N.V. Vasyunina – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Siberian Federal University (SFU), e-mail: nvvasyunina@yandex.ru ● I.V. Dubova – Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, SFU, e-mail: idubova@mail.ru ● K.E. Druzhinin – Deputy Director, Indast-PRO LLC, e-mail: Bearget@mail.ru ● T.R. Gilmanshina – Cand. Sci. (Tech.), Head of Department, SFU, e-mail: gtr1977@gmail.com