

Утилизация солевых отходов методом электродиализа с получением вторичных продуктов

© 2022. М. В. Абакумов, аспирант, ведущий инженер,
А. В. Колесников, к. т. н., доцент,
В. А. Бродский, к. х. н., доцент, Ч. М. Ньейн, аспирант,
Российский химико-технологический университет Д. И. Менделеева,
125047, Россия, г. Москва, Миусская площадь, д. 9,
e-mail: abakumov.maksim2015@yandex.ru

В Российской Федерации (РФ) в 2019–2022 гг. интенсивно проводятся проектные работы по разработке технологий обезвреживания техногенных отходов I и II классов опасности. В 2019 г. в РФ стартовала реформа обращения с промышленными отходами. Главной задачей данной реформы является создание эффективной государственной системы обращения с отходами I и II классов опасности. Правительством РФ был разработан федеральный проект «Инфраструктура для обращения с отходами I–II классов опасности» в составе национального проекта «Экология», в рамках которого планируется создать экотехнопарки для переработки промышленных отходов. В Российский федеральный классификационный каталог отходов входят 444 вида высокотоксичных отходов, в том числе 95 неорганических отходов, содержащих ионы тяжёлых и цветных металлов, 33 особо опасных ртутьсодержащих отхода и 216 органических отходов, включающие растворители, полимеры и нефтепродукты. Около 350 из этих отходов планируется перерабатывать на каждом из экотехнопарков. В связи с высокой актуальностью переработки техногенных отходов в данной статье рассматривается электромембранное получение реагентов серной кислоты и гидроксида натрия из побочного отхода сульфата натрия, который образуется в процессе обезвреживания кислотного-щелочных техногенных растворов. В статье приводится технологическая схема, а также условия проведения электродиализа, применяемые анодные материалы, материалы мембран и рабочие плотности тока. Рассматриваемая технология переработки солевого отхода сульфата натрия с получением вторичных продуктов может быть применена на проектируемых экотехнопарках после линии кислотного-основного обезвреживания.

Ключевые слова: техногенные отходы, электродиализ, отходы I и II классов опасности, переработка солевых отходов.

Disposal of salt waste by electro dialysis with the production of secondary products

© 2022. M. V. Abakumov ^{ORCID: 0000-0003-1026-9137}, A. V. Kolesnikov ^{ORCID: 0000-0002-4586-6612},
V. A. Brodsky ^{ORCID: 0000-0003-2266-795X}, Ch. M. Nyein ^{ORCID: 0000-0003-0337-6719},
Mendeleev University of Chemical Technology of Russia,
9, Miusskaya Sq., Moscow, Russia, 125047,
e-mail: abakumov.maksim2015@yandex.ru

In the Russian Federation in 2019–2022, design work is intensively underway to develop technologies for the neutralization of industrial waste of hazard classes I and II. In 2019, the Russian Federation started the reform of industrial waste management. The main goal of this reform is to create an effective state system for waste management of hazard classes I and II. The Government of the Russian Federation has developed a federal project “Infrastructure for waste management of hazard classes I–II within the framework of the national project “Ecology”, within which it is planned to create ecotechnoparks for processing industrial waste. The Russian federal classifier includes 444 types of highly toxic waste, including 95 inorganic waste containing heavy and non-ferrous metal ions, 33 especially hazardous mercury-containing waste and 216 organic waste, including solvents, polymers and petroleum products. About 350 of these wastes are planned to be processed in each of the ecotechnoparks. Due to the high relevance of industrial waste processing, this article discusses the electromembrane production of sulfuric acid and sodium hydroxide reagents from a by-product of sodium sulfate, which is formed during the neutralization of acid-base industrial solutions. The article presents the technological scheme, as well as the conditions of electro dialysis, the anode materials used, membrane materials and operating current densities. The technology under consideration for processing waste of sodium sulfate salts to obtain secondary products can be applied in the projected ecotechnoparks after the acid-base neutralization line.

Keywords: technogenic waste, electro dialysis, hazard classes I and II waste, salt waste recycling.

В последние годы в Российской Федерации (РФ) большое внимание уделяется процессам переработки промышленных отходов I–II классов опасности. Правительством РФ был разработан федеральный проект «Инфраструктура для обращения с отходами I–II классов опасности» в составе национального проекта «Экология». В рамках этого федерального проекта предусмотрено создание экотехнопарков для переработки техногенных отходов I–II классов опасности. Производственно-технологические комплексы (экотехнопарки) планируется расположить в таких субъектах РФ, как Саратовская область (объект «Горный»), Кировская область (объект «Марадковский»), Удмуртская республика (объект «Камбарка»), Курганская область (объект «Щучье»).

В Российский федеральный классификационный каталог отходов входит 444 вида отходов I и II классов опасности. Эти отходы выделяют в три основные группы.

1. Жидкие, твёрдые и пастообразные неорганические отходы (щёлочи, кислоты, соли тяжёлых и цветных металлов – 95 видов). В их состав входят отработанные растворы серной кислоты, которые, главным образом, используются в производстве хлора, растворы травления сталей на основе серной, соляной и фосфорной кислот, растворы травления титана на основе азотной и плавиковой кислот, растворы азотной кислоты для травления меди.

2. В федеральном классификаторе 33 вида особо опасных ртутьсодержащих отходов. К таким отходам относятся ртутные лампы; термометры; отработанные сорбенты, загрязнённые солями ртути; неорганические и органические соединения ртути; нерастворимые соли ртути.

3. Большую часть отходов около 50% составляют опасные органические отходы (216 видов). Примерами таких отходов являются растворители, полимеры, нефтепродукты, масла, смеси жидких пестицидов, клеевые композиции, кубовые остатки процессов рекуперации. Состав органических отходов очень разнообразен и достаточно сложен для обезвреживания.

Сотрудники ГСПИ, РХТУ им. Д. И. Менделеева разрабатывают технологии и проекты обезвреживания отходов I–II классов опасности. Технологические решения обсуждают на конференциях, публикуют в печати [1–4]. В I квартале 2021 г. получены положительные заключения на разработанные проекты.

В данной статье рассмотрены примеры получения вторичных продуктов (реагентов), которые можно использовать при обезвреживании кислотно-щелочных жидких отходов I–II классов опасности. Проблемой обезвреживания жидких техногенных отходов, очисткой сточных вод занимается большое количество исследователей в РФ [5–10] и за рубежом [11–19]. Основные усилия направлены на извлечение токсичных неорганических загрязнений, обезвреживание органических отходов, обессоливание воды, получение вторичных продуктов из техногенных отходов. Большой практический интерес представляет вторичное использование ресурсов в основном технологическом процессе.

Целью работы является обсуждение проблемы переработки отходов I–II классов опасности, решение которой имеет государственное значение. Также в работе рассматривается способ выделения солевого компонента сульфата натрия из отработанного раствора. Предлагается технологическая схема переработки солевого отхода $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ методом электродиализа, а также условия проведения процесса, материалы мембран и электродов. Представлены теоретические расчёты процесса переработки солевого отхода методом электродиализа.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования является технология процесса электродиализа для переработки солевых отработанных отходов с получением вторичных продуктов, установление параметров проведения электродиализа, применяемых электродных материалов, ионообменных мембран, разработка принципиальной технологической схемы процесса электродиализа для промышленного применения.

Расчёты концентраций исходных веществ и продуктов электролиза, а также энергозатраты процесса электродиализа для различных видов установок были произведены на основании фундаментальных законов электрохимии. В таблицах представлены средние значения результатов.

Результаты и обсуждение

Технологический процесс утилизации кислотно-щелочных отходов с получением вторичного продукта $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$

Рассмотрим для примера технологическую линию, на которой происходит обез-

Таблица 1 / Table 1

Перечень отработанных растворов на линии утилизации кислотно-щелочных отходов [8]
List of waste solutions on the acid-base waste disposal line [8]

Код отхода по ФККО Waste code according to the FCCW	Наименование отхода по ФККО The name of the waste according to the FCCW	Агрегатное состояние, физическая форма Aggregate state, physical form	Состав отхода, % Composition of waste, %
3 10 101 11 32 2	электролит щелочной, отработанный при получении водорода электролитическим методом alkaline electrolyte, used in the production of hydrogen by the electrolytic method	твёрдое в жидком (суспензия) solid in liquid (suspension)	используется в качестве электролита 20–30% раствор КОН или NaOH it is used as an electrolyte 20–30% KOH or NaOH solution
3 12 151 42 10 2	серная кислота, отработанная при осушке хлора в производстве хлора методом мембранного электролиза sulfuric acid used during chlorine drying in chlorine production by membrane electrolysis	жидкое liquid	вода – 18,91 серная кислота – 77,59 механические примеси (кремний диоксид) – 3,50 water – 18.91 sulfuric acid – 77.59 mechanical impurities (silicon dioxide) – 3.50
3 55 341 61 10 2	раствор серной кислоты, отработанный при промывке обжигового газа в производстве цинка sulfuric acid solution used during flushing of firing gas in zinc production	жидкое liquid	вода – 89,99 серная кислота – 10,00 water – 89.99 sulfuric acid – 10.00
3 63 322 21 39 2	отходы ванн пассивации металлических поверхностей, содержащие смесь неорганических кислот waste from passivation baths of metal surfaces containing a mixture of inorganic acids	прочие дисперсные системы other dispersed systems	вода – 47,00 механические примеси – 16,00 серная кислота – 15,00 соляная кислота – 12,00 азотная кислота – 10,00 water – 47.00 mechanical impurities – 16.00 sulfuric acid – 15.00 hydrochloric acid – 12.00 nitric acid – 10.00

Примечание: ФККО – федеральный классификационный каталог отходов.
Note: FCCW – federal classification catalog of waste.

вреживание кислотно-щелочных растворов, содержащих ионы металлов (Fe, Al, Ti, Cu, Zn, Ni).

Отработанные кислотно-щелочные отходы, содержащие, в том числе, ионы тяжёлых металлов (ТМ), поступают в накопитель, где происходит их усреднение и разбавление [5]. Примеры отработанных растворов представлены в таблице 1.

Указанные растворы широко применяются в качестве рабочих для предварительной подготовки поверхности перед нанесением лакокрасочных покрытий (ЛКП), к примеру, на заводе «Сухой».

Усреднённый и разбавленный кислотно-щелочной сток направляется по параллельным линиям в реакторы, в которых осуществляется корректировка pH до значений образования не-

растворимых гидроксидов, фосфатов, карбонатов ТМ, либо нейтрализация стока с использованием в качестве реагентов поступающих на переработку отходов кислот и щелочей, а при отсутствии их требуемого количества растворов кислот/щелочей из ёмкостей для приёма реагентов. В эти же реакторы при необходимости добавляются коагулянты или флокулянты, необходимые для укрупнения образующейся дисперсной фазы.

Раствор с выделенной дисперсной фазой нерастворимых соединений ТМ поступает в отстойник, где происходит его осветление. Осветлённый раствор направляется в электрофлотатор, где происходит доочистка раствора от дисперсной фазы, которую не удалось осадить в отстойнике.

Раствор, подвергшийся электрофлотационной обработке, поступает по параллельным линиям в реакторы, где производится повторная корректировка pH растворов до нейтральных значений. Затем очищенный раствор, представляющий собой воду с нейтральным значением pH, направляется на блок очистки воды.

Пульпа, образовавшаяся в отстойнике и флотошлам, выделившийся в электрофлотаторе, поступают на обезвоживание в вакуумный фильтр-пресс, вакуум в котором создаётся ва-

куумными насосами. Образующийся фильтрат направляется в накопитель и далее на блок очистки воды.

Обезвоженный осадок в виде нерастворимых соединений направляется на блок получения пересыпного материала для полигонов твёрдых коммунальных отходов.

**Переработка вторичного продукта
Na₂SO₄ · 10H₂O
методом электродиализа
с получением H₂SO₄ и NaOH**

При обессоливании очищенного раствора, в состав которого входят сульфаты, хлориды, нитраты натрия, калия и другие растворимые соли (ацетаты, хлораты) за счёт разной растворимости солей можно выделить труднорастворимый осадок Na₂SO₄ · 10H₂O при температурах 8–10 °С. Кроме того, в процессе обессоливания воды при использовании обратноосмотических установок образуется до 70% объёма пермеата (обессоленной воды). Состав пермеата после обратноосмотического обессоливания представлен в таблице 2.

Из таблицы 2 видно, что в наибольшем количестве в пермеате после обратноосмотического обессоливания содержатся хлориды

Таблица 2 / Table 2
Состав пермеата после обратноосмотического обессоливания [20]
Permeate composition after reverse osmotic desalination [20]

Показатель Parameter	Единица измерения Unit of measurement	Значение Value
Общая жёсткость / Total hardness	мг-экв./л / mg-equ./L	0,01
Общая щёлочность / Total alkalinity		0,01
Хлориды / Chlorides	мг/л	10,9
Сульфаты / Sulfates	mg/L	3,2
Натрий + калий / Sodium + potassium		8,86
Солесодержание / Salt content		23,8
Диоксид углерода / Carbon dioxide		3,1

Таблица 3 / Table 3
Физико-химические показатели солевого компонента Na₂SO₄ · 10H₂O [21]
Physico-chemical parameters of the salt component Na₂SO₄ · 10H₂O [21]

Массовая доля, % / Mass fraction, %	Технический / Technological
Na ₂ SO ₄ · 10H ₂ O	99–102
Нерастворимые в воде вещества / Substances insoluble in water	0,05
NH ₄ ⁺ , не более / max	0,02
NO ₃ ⁻ , не более / max	0,02
PO ₄ ³⁻ , не более / max	0,02
Cl ⁻ , не более / max	0,02
Fe, не более / max	0,001
Mg, не более / max	0,02
Ca, не более / max	0,1

и сульфаты натриевых и калиевых солей. Процесс кристаллизации сульфата натрия протекает достаточно эффективно и можно получить солевой компонент $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, который содержит минимальное количество примесей. Некоторые характеристики осадка представлены в таблице 3.

Представленные в таблице 3 данные подтверждают чистоту получаемой соли. Полученный вторичный продукт $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ может быть использован для получения безводного сульфата натрия, который находит применение в стекольной, текстильной и других областях промышленности.

При расчёте материального баланса на технологической линии утилизации кислотно-щелочных отходов установлено использование большого количества реагентов H_2SO_4 и NaOH , которые используются для обработки кислотно-щелочных растворов. В первую очередь, происходит большой расход NaOH (1787,2 т/год) для формирования гидроксидов металлов. Эти реагенты необходимо закупать, готовить и затем обезвреживать. С другой стороны, используя электромембранные установки (трёхкамерные электролизёры) можно получить из отходов $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ вторичные реагенты, а именно растворы NaOH и H_2SO_4 .

Принципиальная схема электромембранного процесса рециклинга реагентов представлена на рисунке. Схема включает следующее оборудование: 1 – трёхкамерный электролизёр; 2 – анодная камера (материал анода PbO_2); 3 – катодная камера (материал катода нержавеющая сталь); 4 – ёмкость приготовления раствора Na_2SO_4 ; 5 – промежуточная ёмкость для электролита Na_2SO_4 ; 5А – твёрдый отход $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$; 5Б – жидкий отход (пермеат); 6 – промежуточная ёмкость; 7, 8 – ёмкости католита (NaOH); 9, 10 – ёмкости анолита (H_2SO_4); 11 – источник тока; 12, 13, 14 – насосы для перекачивания растворов Na_2SO_4 , NaOH , H_2SO_4 ; 15 – щёлочь потребителю (NaOH); 16 – кислота потребителю (H_2SO_4).

Схема функционирует следующим образом. Раствор Na_2SO_4 с концентрацией 120 г/л подаётся в центральную камеру трёхсекционного электромембранного аппарата. В катодной камере происходит наработка NaOH , в анодной камере – H_2SO_4 . Для получения католита и анолита в электролизёр поступает до 90% обессоленной воды, 10% рабочего раствора. Все три камеры электролизёра работают в режиме циркуляции. Для поддержания низких значений напряжений на электролизёре концентрация Na_2SO_4 в центральной камере

постоянна и составляет 120 г/л. В католите в начальный момент времени концентрация NaOH составляет 5 г/л, при завершении электролиза (после 5 ч при плотности тока 2 А/дм²) – 150 г/л. В анодной камере аналогично в начальный момент времени концентрация H_2SO_4 составляет 7 г/л, в конце электролиза – 182 г/л. После окончания процесса 90% щёлочи и 90% кислоты возвращаются на линию обезвреживания кислотно-щелочных отходов для обезвреживания отработанных растворов.

Ряд исследователей приводят лабораторные данные по электрохимическому процессу получения H_2SO_4 , NaOH из Na_2SO_4 [11–14]. В ходе исследования установлены следующие закономерности.

1. Наибольшая концентрация кислоты и щёлочи достигается в непроточной установке, однако её недостатками является большое газообразование, периодический характер действия, малая производительность, отсутствие возможности интенсифицировать процесс. В промышленных условиях целесообразно использовать электролизёр непрерывного действия, так как данная конфигурация позволяет увеличить количество повторяющихся секций, что необходимо для уменьшения энергетических затрат.

2. Перед проведением электролиза необходима глубокая очистка растворов от различных примесных ионов, таких как Ca^{2+} , до содержания менее 0,1 г/л. В примембранном осадке накапливаются щелочноземельные элементы и элементы переходных металлов, в то время как ионы щелочных металлов Na^+ и K^+ эффективно мигрируют через мембрану.

Достижению высоких показателей способствует сокращение соотношения потоков анолита V_a и католита V_k относительно солевого раствора средней камеры V_{cp} , выраженное в первоначальных объёмах циркулирующих растворов: $V_{cp} : V_a = 1 : 0,5-1$ и $V_{cp} : V_a = 1 : 0,4-0,6$. В процессе электролиза объём раствора в средней камере сокращается, а объёмы анолита и католита возрастают.

Проведение электролиза при силе тока 1–3 А и напряжении 4–10 В обеспечивает извлечение из солевого раствора более 99% ионов с выходом по току 50–70%. Производительность составляет около 1 кг/(м²·ч), удельный расход электроэнергии – 7,5 (кВт·ч)/кг. Более высокое концентрирование рекуперированных реагентов в периодическом процессе сопровождается снижением выхода по току и увеличением энергозатрат. Наиболее оптимальным в процессе электролиза является

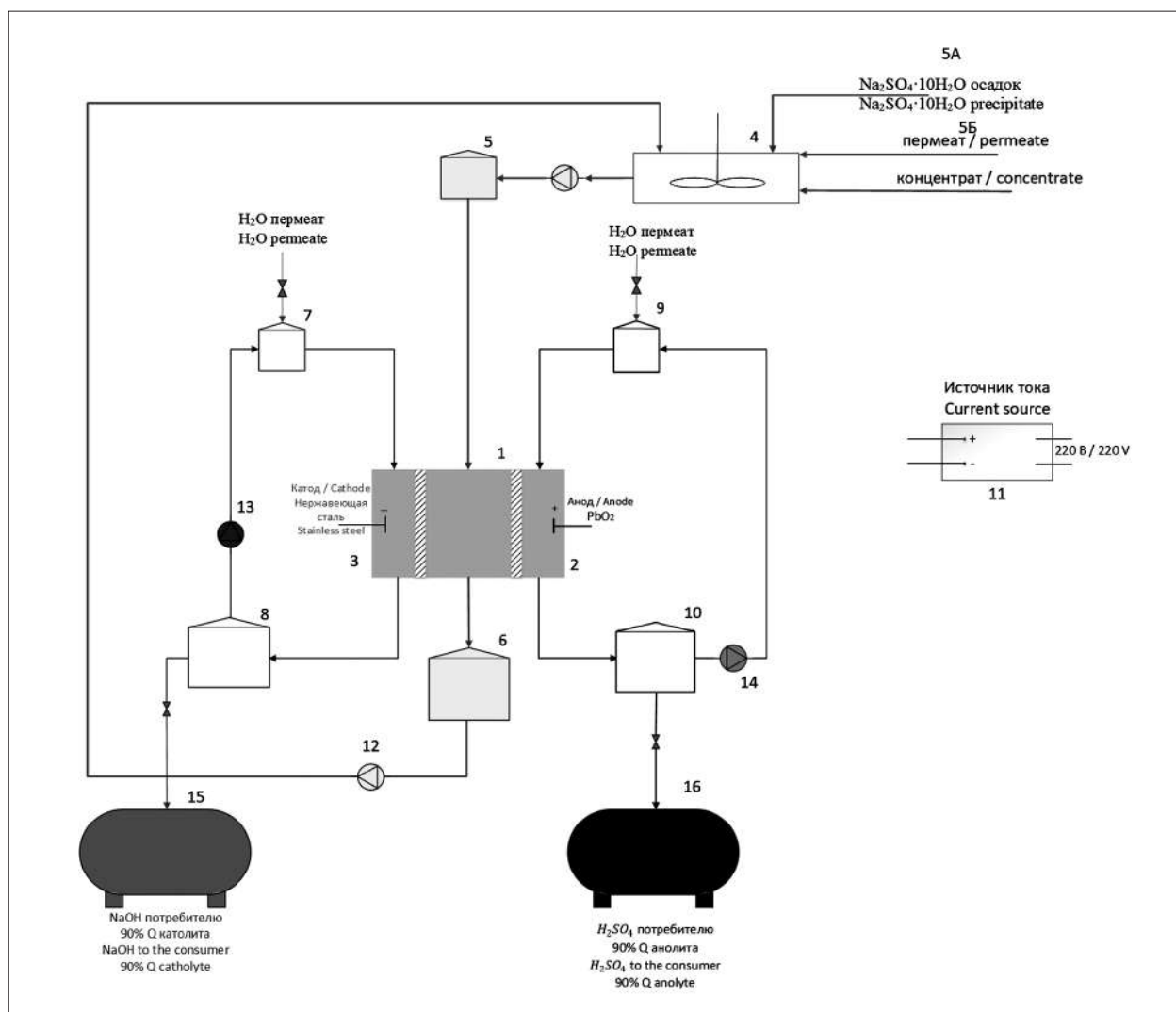


Рис. Принципиальная схема получения растворов H_2SO_4 и $NaOH$ из вторичных отходов Na_2SO_4 (см. пояснения в тексте) / Fig. Schematic diagram of obtaining H_2SO_4 and $NaOH$ solutions from secondary waste Na_2SO_4 (see explanations in the text)

Таблица 4 / Table 4

Влияние времени электролиза на концентрацию католита ($NaOH$) и анолита (H_2SO_4)
Effect of electrolysis time on the concentration of catholyte ($NaOH$) and anolyte (H_2SO_4)

Время, ч Time, h	Плотность тока $i = 1 \text{ A/дм}^2$, $V_a = V_k = 0,25 \text{ л}$ Current density $i = 1 \text{ A/дм}^2$, $V_a = V_c = 0,25 \text{ Л}$		Плотность тока $i = 2 \text{ A/дм}^2$, $V_a = V_k = 0,1 \text{ л}$ Current density $i = 2 \text{ A/дм}^2$, $V_a = V_c = 0,1 \text{ Л}$	
	$c(NaOH)$, г/л / g/L	$c(H_2SO_4)$, г/л / g/L	$c(NaOH)$, г/л / g/L	$c(H_2SO_4)$, г/л / g/L
1	5,97	7,31	29,85	36,57
2	11,94	14,63	59,70	73,13
3	17,91	21,94	89,55	109,70
4	23,88	29,25	119,40	146,27
5	29,85	36,57	149,25	182,84
6	35,82	43,88	179,10	219,40
7	41,79	51,19	208,96	255,97
8	47,76	58,51	238,81	292,54
9	53,73	65,82	268,66	329,10
10	59,70	73,13	298,51	365,67

Таблица 5 / Table 5

Технические характеристики опытно-промышленной установки (1), электрохимического модуля (2) и промышленного электролизёра (3) / Technical characteristics of experimental setup (1), electrochemical module (2) and industrial electrolyzer (3)

Параметры Parameters	Установки / Installations		
	1 (ОП) / 1(EM)	2 (ЭМ) / 2 (EM)	3(ПЭ) / 3(IE)
S площадь мембран, дм ² S membrane area, dm ²	100	1000	10000
ΣI, А	50	500	5000
Количество NaOH, л/ч Amount of NaOH, L per hour	5	50	500
Количество H ₂ SO ₄ , л/ч Amount of H ₂ SO ₄ , L per hour	5	50	500
Количество затраченного Na ₂ SO ₄ , кг/сут Amount of spent Na ₂ SO ₄ , kg per day	3,18	31,8	318
Количество полученного NaOH, кг/сут The amount of NaOH obtained, kg per day	1,79	17,9	179
Количество полученного H ₂ SO ₄ , кг/сут The amount of H ₂ SO ₄ obtained, kg per day	2,19	21,9	219

использование в качестве мембран МК-40Л и МА-41 российского производства компании АО «Щёкиноазот», что обосновывается их доступностью и экономической целесообразностью по сравнению с импортными аналогами.

Авторами статьи приведены расчёты накопления H₂SO₄ (анолит) и NaOH (католит) при мембранном электролизе Na₂SO₄ в течение 10 ч при различных плотностях тока. Расчётные данные для лабораторной ячейки представлены в таблице 4.

Для практической реализации необходимы электрохимические установки большой производительности. Авторами приведены расчёты для опытно-промышленной установки с площадью мембраны 100 дм² (1), а также для электрохимического модуля 1000 дм² (2) и большой промышленной установки, состоящей из 10 модулей (10000 дм²) (3).

В таблице 5 представлены некоторые технические характеристики для аппаратов 1, 2, 3.

Из приведённых данных следует, что для функционирования промышленной установки необходимо 318 кг сульфата натрия. При этом образуется 179 кг NaOH и 219 кг H₂SO₄.

Заключение

В данной работе рассмотрены примеры получения вторичных продуктов (реагентов), которые можно использовать при обезвреживании кислотно-щелочных жидких отходов I–II классов опасности. Авторами статьи предложена принципиальная схема получения растворов NaOH и H₂SO₄ из отработанного

отхода Na₂SO₄, который образуется в больших количествах на технологической линии утилизации кислотно-щелочных отходов. Полученные в процессе переработки Na₂SO₄ кислота и щёлочь могут быть применены для обработки кислотно-щелочных растворов, что позволит существенно сократить затраты на закупку этих реагентов. Приведены параметры проведения электролиза, материалы электродов и мембран, а также расчёты накопления H₂SO₄ и NaOH при мембранном электролизе Na₂SO₄.

Из результатов статьи можно сделать следующие выводы:

1. С линии утилизации кислотно-щелочных отходов можно выделить солевой компонент Na₂SO₄ · 10H₂O при пониженной температуре (8–10 °С), из которого можно получить NaOH и H₂SO₄ методом электродиализа.

2. Для проведения электродиализа в процессе переработки солевых отходов рекомендуется использовать анод на основе диоксида свинца (PbO₂), так как он обладает необходимой устойчивостью и экономически выгоден по сравнению с другими анодными материалами. В качестве катода используют нержавеющую сталь. В проведении электродиализа используют ионообменные мембраны МА-41 и МК-40Л российского производства.

3. Оптимальными значениями плотности тока для проведения электродиализа солевого раствора являются значения 1–3 А/дм², которые позволяют проводить электродиализ с высоким выходом продуктов по току. При больших значениях плотности тока скорость процесса увеличивается, но уменьшается вы-

ход по току продуктов электролиза. Кроме того, высокие значения плотности тока отрицательно сказываются на стойкости ионообменных мембран.

4. На основании проведённых расчётов промышленная установка по переработке солевых отходов позволит получать в сутки 179 кг щёлочи (NaOH) и 219 кг серной кислоты (H₂SO₄) из отработанного сульфата натрия Na₂SO₄.

Работа выполнена при финансовой поддержке РХТУ им. Д.И. Менделеева, прикладной научно-исследовательский проект молодых штатных работников РХТУ им. Д.И. Менделеева в рамках программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030» № ВИГ-2022-016.

References

1. Deghles A., Kurt U. Treatment of tannery wastewater by a hybrid electro-coagulation/electrodialysis process // Chemical Engineering and Processing. 2016. V. 104. P. 43–50. doi: 10.1016/J.CEP.2016.02.009
2. Huang C., Xu T., Zhang Y., Xue Y., Chen G. Application of electrodialysis to the production of organic acids: state-of-the-art and recent developments // Journal of Membrane Science. 2007. V. 288. No. 1–2. P. 1–12. doi: 10.1016/J.MEMSCI.2006.11.026
3. Shulenina Z.M., Bagrov V.V., Desytov A.V. Man-made water. Problems, technologies, resource value. Moskva: Publishing house MGTU im. N.E. Bauman, 2015. 401 p. (in Russian).
4. Mazhuga A.G., Kolesnikov V.A., Lemeshev D.O., Kon'kova T.V., Korolkov M.V., Kolesnikov A.V. Personnel training for solving the problem of neutralization of technogenic waste of hazard classes I and II // Theoretical and Applied Ecology. 2020. No. 4. P. 231–236 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-4-231-236
5. Mazhuga A.G., Kolesnikov V.A., Sakharov D.A., Korolkov M.V. Technogenic waste of hazard classes I–II – a resource for obtaining secondary products // Theoretical and Applied Ecology. 2020. No. 4. P. 61–67 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-4-061-067
6. Microorganisms as agents of bioremediation of contaminated soils / Eds. T.Ya. Ashikhmina, L.I. Domracheva. Kirov: VyatGU, 2018. 261 p. (in Russian).
7. Akinin N.I. Technosphere safety. Basics of predicting the explosiveness of steam-gas mixtures. Moskva: Intellect, 2016. 248 p. (in Russian).
8. Brodsky V.A., Kolesnikov A.V., Malkova Yu.O., Kisilenko P.N., Perfilova A.V. Technological solutions and experience of industrial processing of liquid acid-base waste // Theoretical and Applied Ecology. 2021. No. 4. P. 34–42 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2021-4-034-042
9. Kolesnikov V.A., Il'in V.I., Brodsky V.A., Kolesnikov A.V. Electroflotation during wastewater treatment

and extraction of valuable compounds from liquid technogenic waste: a review // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2017. V. 51. No. 4. P. 361–375 (in Russian). doi: 10.7868/S0040357117040054

10. Korolkov M.V., Mazhuga A.G. Fundamentals of the state policy of the Russian Federation to create a new industry for industrial waste processing // Theoretical and Applied Ecology. 2020. No. 4. P. 6–12 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-4-006-012

11. Akhter M., Habib G., Qamar S.U. Application of electrodialysis in waste water treatment and impact of fouling on process performance // J Membr. Sci. Technol. 2018. V. 8. No. 2. Article No. 1000182. doi: 10.4172/2155-9589.1000182

12. Sakar H., Balcik-Canbolat C., Karagunduz A., Keskinler B. Sulfate removal from nanofiltration concentrate of alkaloid wastewater by electrodialysis // Desalination and Water Treatment. 2015. V. 57. No. 44. P. 21003–21014. doi: 10.1080/19443994.2015.1125803

13. Silva V., Poiesz E., Heijden P.V. Industrial wastewater desalination using electrodialysis: evaluation and plant design // Journal of Applied Electrochemistry. 2013. V. 43. P. 1057–1067. doi: 10.1007/s10800-013-0551-4

14. Luiz A., Spencer E., McClure D.D. Membrane selection for the desalination of bio-refinery effluents using electrodialysis // Desalination. 2018. V. 428. P. 1–11. doi: 10.1016/J.DESAL.2017.11.006

15. Ilhan F., Kabuk H.A., Kurt U. Evaluation of treatment and recovery of leachate by bipolar membrane electrodialysis process // Chem. Eng. Process. 2014. V. 75. P. 67–74. doi: 10.1016/J.CEP.2013.11.005

16. Lee H., Sarfert F., Strathmann H. Designing of an electrodialysis desalination plant // Desalination. 2002. V. 142. P. 267–286. doi: 10.1016/S0011-9164(02)00208-4

17. Lazarev S.I., Kovalev S.V., Kovaleva O.A., Konovalov D.N. Design and calculation of effective separation area of flat-chamber electrobaromembrane equipment // Chemical and Petroleum Engineering. 2019. V. 55. No. 5–6. P. 353–360. doi: 10.1007/s10556-019-00630-9

18. Shestakov K.V., Firpo R., Bottino A., Comite A. Preliminary study of electrodialysis with model salt solutions and industrial wastewater // International conference Frontiers in Wastewater Treatment and Modelling, Palermo, 2017. P. 656–661. doi: 10.1007/978-3-319-58421-8_103

19. Monshi A., Foroughi M.R., Monshi M.R. Modified scherrer equation to estimate more accurately nano-crystallite size using XRD // World Journal of Nano Science and Engineering. 2012. V. 2. P. 154–160. doi: 10.4236/wjnse.2012.23020

20. Tikhonov I.A., Vasiliev A.V. Water desalination method (options) // Patent RU 2655995 C1. Application: 2017140514, 21.11.2017. Date publication: 30.05.2018. Bull. 16 (in Russian).

21. Kolesnikov A.V., Makarova A.S., Fedoseev A.N., Brodsky V.A. Modern methods of neutralization and processing of waste and effluents containing heavy metals, including mercury-containing waste. Moskva: RHTU im. D.I. Mendeleeva, 2021. 311 p. (in Russian).