

УДК 504.064.4, 628.316.12

DOI: 10.46548/21vek-2021-1056-0045

## ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРОИЗВОДСТВ ОТ СОЛЕЙ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ

© 2021

**Демидов Артем Андреевич**, соискатель кафедры «Химия и инженерная экология»

**Пашинин Валерий Алексеевич**, доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры «Химия и инженерная экология»

*Российский университет транспорта (МИИТ)*

(127994, Россия, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, строение 9, e-mail: info@rut-miit.ru)

**Полянская Екатерина Александровна**, кандидат биологических наук,

доцент кафедры «Биотехнологии и техносферная безопасность»

*Пензенский государственный технологический университет*

(440039, Россия, г. Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, д. 1а/11, e-mail: polyanka05@mail.ru)

**Панфилова Ирина Сергеевна**, преподаватель кафедры «Общей и прикладной физики»

*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет*

(129337, Россия, г. Москва, Ярославское шоссе, 26, e-mail: 012340@mail.ru)

**Зупарова Валентина Владимировна**, магистр

*Пензенский государственный технологический университет*

(440039, Россия, Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, д. 1а/11, e-mail: zuparova\_vv@mail.ru)

**Аннотация.** Статья относится к области техносферной безопасности транспортных систем, в частности к разработке метода по очистке сточных вод на машиностроительных предприятиях, которое является одним из основных источников загрязнения гидросферы. Наиболее эффективно решать проблему очистки сточных вод от солей тяжелых металлов целесообразно на этапе проектирования очистных сооружений, для чего необходимо установить характер загрязнений и выбрать существующие методы очистки. В качестве материалов и методов исследования рассматриваются конструкции электродиализа и методы очистки сточных вод предприятий промышленности. Обосновываются требования к методу очистки сточных вод транспортной промышленности, отсутствуют надежные способы очистки стоков гальванических производств от солей тяжелых металлов, не решена проблема их утилизации из осадков. Разрабатывается способ нанесения покрытий по безотходным технологиям. В статье приведены результаты исследований по обоснованию требований и выбору метода очистки сточных вод предприятий промышленности.

**Ключевые слова:** мониторинг, очистка сточных вод, соли тяжелых металлов, техносферная безопасность.

## PURIFICATION WASTE WATER FROM SALTS HEAVY METALS OF INDUSTRIAL PRODUCTIONS

© 2021

**Demidov Artem Andreevich**, applicant for the department of chemistry and engineering ecology

**Pashinin Valery Alekseevich**, doctor of technical sciences, professor,  
professor of the department of chemistry and engineering ecology

*Russian University of transport*

(127994, Russia, Moscow, Obraztsova St., 9 building 9, e-mail: info@rut-miit.ru)

**Polyanskova Ekaterina Aleksandrovna**, candidate of biological sciences,  
associate professor of the department of biotechnology and technosphere security

*Penza state University of technology*

(440039, Russia, Penza, Baidukova passage/Gagarin street, 1A / 11, e-mail: polyanka05@mail.ru)

**Panfilova Irina Sergeevna**, lecturer of the department of general and applied physics

*National research Moscow State University of civil engineering*

(129337, Russia, Moscow, Yaroslavl'skoye Av., 26, e-mail: 012340@mail.ru)

**Zuparova Valentina Vladimirovna**, master's student

*Penza state technological University*

(440039, Russia, Penza, BaydukovProyezd / Gagarin Street, 1a/11, e-mail: zuparova\_vv@mail.ru)

**Abstract.** The article relates to the field of technospheric safety of transport systems, in particular to the development of a method for cleaning waste machine-building enterprises, which are one of the main sources of pollution of the hydrosphere. The most effective solution to the problem of wastewater treatment from salts of heavy metals is advisable at the design stage of treatment facilities, for which it is necessary to establish pollution and select treatment methods. Designs of electrodialysis and methods of wastewater treatment at industrial enterprises are considered as materials and research methods. The requirements for the method of purification of waste water from the transport industry are substantiated, there are no reliable methods of purification of wastewater from galvanic production from salts of heavy metals, the problem of their utilization from precipitation has not been solved. Methods for applying coatings using waste-free technologies are being developed. The article presents the results of studies on the substantiation of the requirements and the choice of a method for treating industrial wastewater.

**Keywords:** monitoring, wastewater treatment, heavy metal salts, technosphere safety.

**Введение.** Растущий спрос на воду в городских, сельских и промышленных районах создает серьезные экологические и экономические проблемы, а также проблемы в управлении водными ресурсами, связанные с истощением ресурсов и удалением отходов. Некоторые промышленные процессы используют большие объемы воды, таким образом, производя большое количество сточных вод или отработанных потоков с загрязняющими веществами и ценными компонентами. Кроме того, стоки муниципальных очистных сооружений не могут использоваться повторно. Восстановление воды дает возможность устойчивого развития. С другой стороны, это требует разработки и внедрения передовых методов, которые представляют собой технико-экономический вызов.

В этой связи концепция нулевого сброса жидкости (ZLD) направлена на разработку стратегий для создания закрытого материального цикла, тем самым минимизируя жидкие отходы [1-3]. Такой подход – конкретное достижение экономики [4, 5], которая предлагает схемы, основанные на сокращении, альтернативном повторном использовании, переработке и восстановлении материалов в процессах производства распределения и потребления»[6].

Мембранные процессы вызывают большой интерес, и несколько исследований привели к значительным достижениям [7]. Среди них электромембранные технологии разделения ионов селективным транспор-

том через ионообменные мембраны (ИЭМ) под действием электрического поля. Большое разнообразие электромембранных процессов разработано [8–11].

**Целью** работы является мониторинг и оценка техносферной безопасности транспортных средств, а также очистка сточных вод и удаление отходов.

В частности, электродиализ (ED) производит два потока с разными концентрациями, протекающими в альтернативных отсеках, разделенных альтернативно катионообменными мембранами (CEM) и анионообменными мембранами (AEM). ED может быть рентабельным благодаря свойствам, благоприятным для достижения высокой селективности и извлечения продукта, а также устранением или ограниченной потребностью в химических веществах [8, 9, 11]. Также было установлено несколько установок ED для производства поваренной соли из морской воды методом опреснения. Тем не менее, многие исследования были сосредоточены на применении методов ЭД в (био) химии, пищевой и фармацевтической промышленности [8], включая очистку сточных вод, восстановление химикатов или других ценных продуктов и удаление токсичных компонентов [8, 9].

Что касается очистки сточных вод с помощью ED, исследования показывают экспоненциальный рост в последние годы (рис. 1). Более 75% из 879 научных документов, опубликованных с 1969 г. по настоящее время.

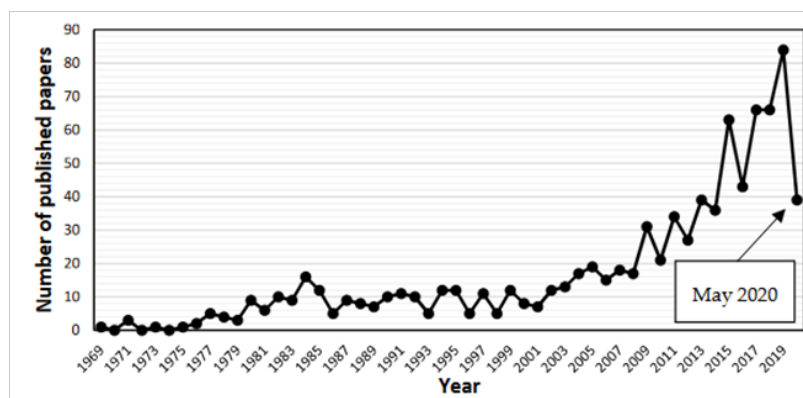


Рисунок 1 – Хронология научных документов, представленных в Scopus с «электродиализом» и «сточными водами»

**Материалы и результаты исследования.** Многие промышленные стоки (например, от обработки металлов, дубления, обработки целлюлозы и бумаги) имеют сложный состав с загрязнителями и/или ценными компонентами, например, ионами тяжелых металлов, кислотами, органические вещества и т.д. Точно так же очищенные сточные воды из источников городского хозяйства или животноводства содержат: например, питательные вещества. Наконец, рассолы опреснительных заводов могут поваренную соль [12–15].

В 2010 году Стратманн описал принцип ED, условия его работы и конструктивные особенности: уделяя особое внимание опреснению воды и последним достижениям (профилированные мембраны).

Большое разнообразие использования обычных ED и аналогичные технологий обсуждаются путем анали-

за результатов экспериментов, характеристик процесса, сильных сторон и недостатков, а также технико-экономической конкурентоспособности. Последние достижения и новые приложения рассмотрены вместе с примерами среди немногих хорошо зарекомендовавших себя реализаций в реальных условиях.

**Основы процесса электродиализа.** Принцип работы и конструкция/рабочие особенности процессов ED. На рисунке 2а изображена схема обычного ЭД. Создается совокупность чередующихся AEM и CEM с чередующимися каналами разбавления и концентрата. По крайним сторонам стек ED завершается электродные отсеки. Здесь внешний источник питания устанавливает разность электрических потенциалов, который вызывает окислительно-восстановительные реакции. Постоянный электрический ток течет через

внешнюю цепь, а через батарею - в виде ионного тока с катионами и анионами, мигрирующими к катоду, а также анод соответственно. Блокировка катионов *IEM* приводит к селективному переносу, в результате чего уменьшение / увеличение концентрации соли в каналах разбавления / концентрирования соответственно. Повторяющийся блок в обычном пакете, а именно «пара клеток», включает *AEM*, разбавитель, *CEM* и концентрат. Два входных канала могут отличаться друг от друга. Количество пар ячеек в электродиализаторах колеблется от нескольких или нескольких десятков в лабораторных или экспериментальных масштабах, до сотен в коммерческих стеках для реальных приложений. Активная площадь составляет примерно от 0,01 до 1 м<sup>2</sup> для одинарной мембраны. Конфигурация «пластина и рама», безусловно, является наиболее распространенной. Сетчатые прокладки (типичная толщина от ~ 300 мкм до ~ 2 мм [6]), снабженные прокладками, помещаются между *IEMs*, чтобы создать подачу отсеков (рис. 26). Двумя основными конструкциями каналов, заполненных спейсерами, являются листовые и извилистые направления [6]. В первом случае жидкость течет примерно прямо по прямоугольному каналу (рис. 26). В последнем случае субстанция движется по серпантину. U-образные каналы с половинчатыми элементами почти обычное дело в больших установках, как и в схемах извилистых траекторий, в то время как листовые проточные каналы используются чаще для небольших стопок. В мембранах со встроенными профилями не используются сетчатые прокладки [6], но они используются только для теоретических или экспериментальных исследований. Типичный диапазон скорости жидкости составляет 1–10 см/с. Однако на извилистых траекториях скорость может быть увеличена до ~ 50 см/с, чтобы противодействовать более плохому перемешиванию. В большинстве случаев режимы течения устойчивые, но турбулентность может возникать и при более высоких скоростях [6].

Пакетные операции с рециркуляцией раствора типичны для лабораторных исследований, в то время как непрерывные процессы в основном ограничиваются промышленными предприятиями. Операция «подача и отвод» (частичная непрерывная рециркуляция) обычно применяется для контроля за возвратом воды и концентрацией на выходе [8].

Многоступенчатые схемы могут быть разработаны с несколькими конфигурациями (например, с несколькими гидравлическими и/или электрическими ступенями) для достижения требуемых характеристик продукта. *IEM* страдают от явления засорения меньше, чем полупроницаемые мембраны (например, для обратного осмоса). Однако, в зависимости от обрабатываемых растворов, *IEM* могут серьезно ухудшиться, что приведет к более высоким электрическим сопротивлениям и даже к физическим повреждениям. Как взвешенные, так и растворенные твердые вещества (органические и неорганические) могут вызвать загрязнение мембраны. Органические анионы и неорганические соединения часто подразумевают за-

грязнение *AEM* и *CEM* соответственно [9]. Загрязнение вызванное труднорастворимыми осадками солей называется масштабированным. Обратный электродиализ (*EDR*) обычно применяется для уменьшения загрязнения. В результате заряженные компоненты удаляются с поверхности ИЭМ путем миграции в обратном направлении.

Кроме того, методы предварительной обработки сырья и очистки труб на месте (кислотные и/или щелочные растворы) могут предотвратить и удалить обрастание соответственно.

Биполярный мембранный электродиализ (*BMED*) использует как монополярные мембраны, так и биполярные мембраны. (*BM*s) для образования кислоты и основания путем диссоциации воды (рис. 2с). БМ состоит из перекрывающегося катионообменного слоя (*CEL*) и анионообменного слоя (*AEL*), промежуточный слой который тоньше, чем 10 нм [8], способствует диссоциации воды при приложении напряжения (> 0,83 В), тем самым высвобождая  $H^+$  и  $OH^-$  [8] со скоростью на шесть (или более) порядков больше, чем в растворе [2]. Это вызвано каталитической ролью функциональных групп и / или катализатора в биполярной области, и сильное электрическое поле (второй эффект Вина) [1]. Механизмы переноса ионов и диссоциации воды все еще изучается с помощью теоретических подходов и численных моделей [1].

Новые техники приготовления на основе методов электроспиннинга производят высокопроизводительные БМ [3]. На рисунке 2с изображена трехкомпонентная система *BMED*, которая превращает соль в кислоту и основание. Повторяющаяся ячейка состоит из: *AEM*, кислотного отсека, *BM*, основного отсека, *CEM* и разбавленной соли.

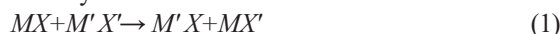
Протоны и гидроксильные ионы, генерируемые в биполярной области электрическим полем, пересекают *CEL* и *AEL* и мигрируют в кислотный и основной канал, соответственно, в то время как солевые анионы и катионы (например,  $Cl^-$  и  $Na^+$ ) в солевом канале пересекают монополярные ИЭМ и мигрируют в кислотно-щелочной раствор, соответственно. Тем не менее, были разработаны другие схемы БМЭД с двухкамерным отсеком, повторяющимися единицами, с мембранами *BM-AEM* или *BM-CEM* для производства кислоты или основания (и солевого подщелачивания или подкисления субстанции). Эти конфигурации используются, когда возможно или желательно получить только один раствор с высокой степенью чистоты, применимый в процессах регенерации [4]. Далее *BMED* конфигурации включают тройку ячеек с двумя монополярными наушниками одного типа.

Выходной солевой поток направляется в кислотный или щелочной канал для достижения более высоких скоростей восстановления [5].

Селективная ЭД происходит в электродиализаторах, содержащих одновалентные селективные мембраны (*MBM*), которые могут быть анионными (*MVA*) и / или катионными (*MVC*) и разделять одновалентные и многовалентные ионы. В частности, процесс се-



лективного диализа (*SED*) имеет трехкомпонентную конфигурацию с *MVM* и два обычных *IEM* и фракционирует ионы с помощью трех разных потоков [9]. На рисунке 2d представлен эскиз фракционирования *SED*  $SO_4^{2-}$  из  $Cl^-$ , содержащегося в исходном растворе. Результаты процесса – обессоливание смеси, обогащение продукта двухвалентными анионами и концентрация рассола с одновалентными ионами. Решетки *ED* могут быть организованы для выполнения метатезиса солей, известного также как «двойное разложение» (обмен катионов и анионов между солями). С парой солей получается:



Электродиализный метатезис (*EDM*) [4] имеет

повторяющийся блок с четырьмя отсеками, который включает в себя два разбавить и два канала концентрата, все отличные друг от друга, разделенные двумя *AEM* и двумя *CEM* (рис. 2е). Подача (*D1*) содержит соль или смесь солей, в то время как раствор замещения течет по другой канал разбавления (*D2*). Из раствора *D1* анионы переходят в концентрат *C1*, а катионы перемещаются к концентрату *C2*; а из раствора замещения *D2* анионы переходят в концентрат *C2*, и катионы переходят в концентрат *C1*. В результате метаболитов солей между субстанцией и замещение раствора происходит в продуктах-концентрах. В примере на рисунке 2е соли  $Na^+$  и  $Cl^-$  образуются внутри отсеков *C1* и *C2* соответственно.

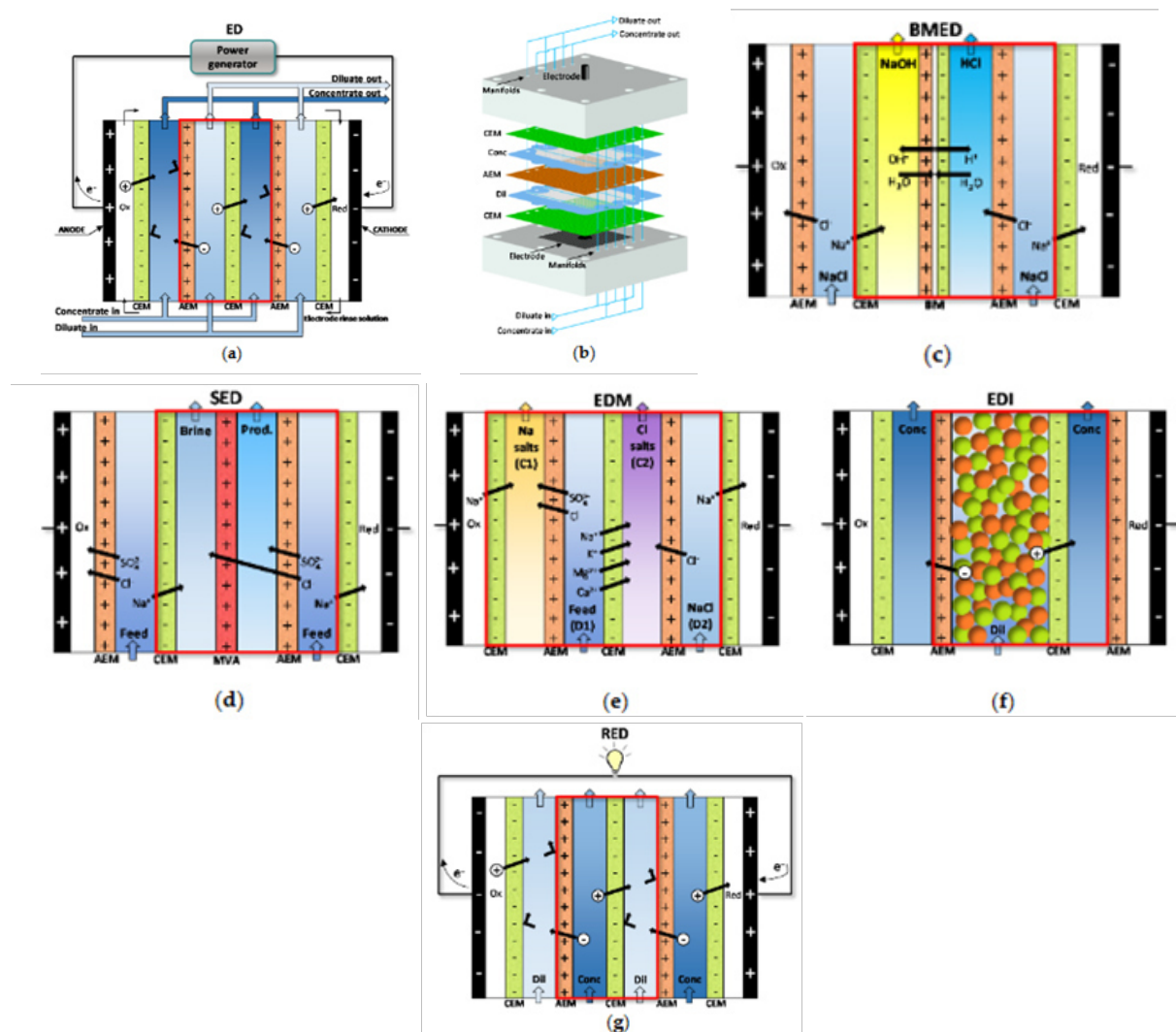


Рисунок 2 – Схема методов ЭД: (а) Обычный электродиализ (ЭД); (б) Стек ЭД лабораторного масштаба с листовой конструкцией (покомпонентное изображение одной пары ячеек с дополнительным СЕМ); (с) Трехкамерный биполярный мембранный электродиализ (БМЭД); (д) Селектродиализ (SED) с MVA (рисунок относится к фракционирование  $SO_4^{2-}$  из  $Cl^-$ ); (е) Электродиализный метатезис (EDM); (ф) Электродеионизация (EDI) с ионообменными смолами, заполняющими разбавитель; (г) Обратный электродиализ (КРАСНЫЙ). Красные прямоугольники обозначают повторяющиеся единицы.

Панели (а, б, ж) воспроизведены (адаптированы) с разрешения из [10]

Для повышения эффективности ЭД внутри каналов можно вводить ионообменные смолы (*IXR*).

Гибридизация *ED* и ионного обмена (*IX*) называется электродеионизацией (*EDI*) или непрерывной электродеионизацией (*CEDI*) [3] (рис. 2f). В установках *EDI*

непрерывно регенерируемые слои *IXR* в разбавитель (иногда также в составе концентрата) вызывает увеличение проводимости и концентрацию уменьшение поляризации. Достигается улучшенный перенос ионов, что позволяет эффективно чистить очень разбав-

ленные растворы благодаря более низкому электрическому сопротивлению и более высоким предельным токам. Возрождение *in situ* *IXR* осуществляется  $H^+$  и / или  $OH^-$  из-за диссоциации воды, происходящей на биполярных контактах.

*IXRs* или между *IXR* и *IEM* [4]. *EDI* больше подходит для производства сверхчистой промышленной воды [4] и для очистки некоторых видов сточных вод, например сточных вод, содержащих ионы металлов [2]. Кроме того, полностью регенерированные *IXR* могут ионизировать и удалять слабоионизированные частицы. ( $SiO_2$ ,  $CO_2$ , бор и  $NH_3$ ).

Сложный транспортный механизм обсуждается уже несколько лет посредством различных моделей [4]. Он включает следующие этапы [7]: диффузия ионов через раствор (этап управления), *IX*, миграция через слой *IXR* и *IEM*, и регенерация *IXR*.

Установки *EDI* имеют несколько конфигураций [2] за счет изменения состава слоя *IXR*. и структура (смешанная, раздельная или многоуровневая), а также количество, размещение и тип наушников, включая использование БМ в качестве мест для диссоциации воды. Модули *EDI* могут быть собраны с несколько повторяющихся единиц между электродами, аналогично пакетам *ED*. Однако другие договоренности всего несколько отсеков (три и более), в том числе и электродные. Среди них некоторые установки используют электролиз воды на электродах для доставки  $H^+$  и  $OH^-$  для *IXR*. электрогенерации [5], что значительно отличается от традиционной ЭД.

Производительность в *EDI* может происходить из-за небольшого КПД по току в операциях с высокой диссоциацией воды [9], и от неоднородных распределений потока [4]. Первая проблема может быть решена путем определения оптимального значения приложенного напряжения, что приводит к сосуществованию диссоциации воды и электроконвекции в сверхпредельном режиме, что может повысить эффективность процесса [5]. Последнюю проблему можно решить за счет использования пластин из фиксированной смолы [2].

Обратный электродиализ (*RED*) – процесс, противоположный *ED*. *RED* производит электроэнергию преобразование свободной энергии смешения двух потоков с разной концентрацией соли (энергия градиента солености, или синяя энергия или осмотическая энергия) и осуществляется с помощью пакетов, эквивалентных единицам *ED* [7] (рис. 2g). Раствор с высокой соленостью (концентрат, который фактически разбавляется вдоль канала) и с низкой соленостью раствор (разбавитель, который фактически концентрируется вдоль канала) протекает через два отсека. Самые обычные решения – морская и речная вода, которые обеспечивают максимальная теоретическая плотность энергии ~ 880 кДж/м<sup>3</sup> (равные количества обоих растворов). Тем не менее, недавние исследования оценили использование сточных вод. Принцип работы *RED* основан на электрохимическом равновесии исключения иона, который генерирует электри-

ческий потенциал над *IEM*, погруженными между двумя растворами с разной концентрацией (т.е. с разным химическим потенциалом). Сумма всех мембран потенциалов пакета – это его электродвижущая сила. Его можно измерить как разность электрических потенциалов в условиях холостого хода (напряжение холостого хода). Когда цепь замкнута внешней нагрузкой, окислительно-восстановительные реакции в электродных отсеках преобразуют поток внутренних ионов во внешние электроны. Это означает, что напряжение на стеке, которое соответствует напряжению на внешнем электроде. Обратите внимание, что в *RED* (генератор) катод и анод положительный и отрицательный соответственно, т.е. с противоположным зарядом по отношению к ЭД (пользователю). В добавление к электроэнергии, блоки *RED* могут производить  $H_2$  посредством катодного восстановления. Выходная мощность зависит от электродвижущей силы и сопротивления пакета.

Отходы промышленных предприятий могут иметь различный состав. Однако они часто содержат растворенные ионы. Электродиализную очистку промышленных сточных вод можно разделить на: отделение тяжелых ионы металлов; регенерация кислоты / основания, конверсия соли; опреснение.

Разделение ионов тяжелых металлов. Тяжелые металлы – это загрязнители, характеризующиеся токсичностью, канцерогенностью, не подверженностью биологическому разложению, и стойкость в окружающей среде и в живых существах. Среди процессов, предлагаемых для сточных вод, содержащих ионы тяжелых металлов [5], электродиализные методы апробированы на промышленных предприятиях. Стоки от некоторых процессов (металлообработка, кожевенная промышленность и т.д.), предназначенные для повторного использования. Например, *ED* может рекуперировать воду и металлы из отработанных ванн или промывных вод в процессе гальваники, а также различных конфигураций *EDI* предлагают несколько альтернатив *ED* [2]. Несколько исследований были сосредоточены на явлениях переноса путем оценки свойств *IEMs*, эффекта *pH*, образование комплексов и конкуренция ионов, а также путем разработки модифицированных или новых *IEM*. Из них, эксперименты с водными растворами *Ni*, *Cu*, *Zn*, *Cr*, *Fe* и *Pb* были проведены, а также со смесями (например, *Ni*, *Cu* и *Pb*, или *Cu* и *Zn*), что дает важную информацию об основных явлениях и процессах ЭД. Еще один важный аспект – определение оптимальных условий работы [12-15].

С этой целью был принят метод Тагучи. Для экспериментов с ионами металлов, присутствующими в виде отдельных солей или смесей солей [4]. Это мощный метод планирования экспериментов с оптимизацией управляющих параметров и основывается на ортогональных массивах, что сокращает количество тестов. Статистический анализ результатов экспериментов представляет собой дисперсионный анализ, оценка дисперсии ошибок и относительной важности

различных факторов. Кроме того, проверенные модели могут быть приняты для анализа чувствительности и исследований оптимизации [3].

**Закключение.** Охрана окружающей среды в части предотвращения загрязнения сточных вод от солей тяжелых металлов в целом являются ключевыми задачами, стоящими перед современным обществом.

Использованный в работе метод может позволить получить следующий экономический результат: увеличить выравнивающий эффект действия электролита и плотность осадка, значительно снизить саморазряд электродов; варьируя постепенно содержание ПАВ в электролите, формировать осадки с планируемой системой пор (структурой, извилистостью, диаметром пор); увеличить значительно стабильность разрядных характеристик. Такое усовершенствование процесса приведет к снижению энергозатрат и уменьшения загрязнения сточных вод солями тяжелых металлов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Демидов А.А., Пашинин В.А., Журавлёва М.А. Безопасность объектов транспортной инфраструктуры в части определения соединений селена // Современные проблемы совершенствования работы железнодорожного транспорта: Межвузовский сборник научных трудов, самостоятельное электронное издание. – Москва, РУТ (МИИТ): РОАТ, 2021 г. – С. 111-117.
2. Дмитриенко Т.Г. Влияние скорости анодного окисления кадмиевого электрода на приэлектродную концентрацию гидроксокомплексов кадмия в растворах КОН различных концентраций // Т.Г. Дмитриенко, Е.А. Хомская, Н.Ф. Бурданова, И.А. Казаринов // Электрохимия. – 1998. – Т.34, № 5. – С. 473-479.
3. Дмитриенко Т.Г. Поверхностная активность гетероароматических соединений пирилевого и хромилевого рядов в реакциях электроосаждения металлов // С.С. Попова, Т.Г. Дмитриенко, Е.В. Ченцова, А.И. Узбякова, С.Ю. Шестопалко // Материалы Всероссийской конференции «Электрохимия и экология, посвященная 80-летию со дня рождения Заслуженного деятеля науки и техники РСФСР, Почетного химика РСФСР, академика РАН, д.х.н., профессора Смирнова В.А.» – Новочеркасск. – 2008. – С. 70.
4. Дмитриенко Т.Г. Поверхностная активность селено-содержащих гетеро-ароматических соединений в реакциях катодного выделения – анодного растворения кадмия и его сплавов на медном электроде // С.С. Попова, Т.Г. Дмитриенко, А.С. Узбякова, Е.В. Ченцова, А.И. Горшков // Материалы 4-ой Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Экологические проблемы промышленных городов» – Саратов, СГТУ. – 2009. – С. 89 – 91.
5. Дмитриенко Т.Г., Горшков А.И. Соли 9R-Симм.-октагидрохалькогеноксантилия как эффективные ингибиторы и блескообразующие добавки в процессах получения покрытий на медном электроде // Сб. трудов Международной конф. «Пленки и покрытия». – Петербург. – 2011. – С. 202-205.
6. Larchet, C., Nouri, S., Auclair, B., Dammak, L., Nikonenko, V. Application of chronopotentiometry to determine the thickness of diffusion layer adjacent to an ion-exchange membrane under natural convection. Adv. Colloid Interface Sci. 2008, 139, 45–61.
7. Zabolotsky, V.I.; Nikonenko, V.V. Effect of structural membrane inhomogeneity on transport properties. J. Membr. Sci. 1993, 79, 181–198.
8. Veerman, J. The Effect of the NaCl Bulk Concentration on the Resistance of Ion Exchange Membranes—Measuring and Modeling. Energies 2020, 13, 1946.
9. Porada, S.; van Egmond, W.J.; Post, J.W.; Saakes, M.; Hamelers, H.V.M. Tailoring ion exchange membranes to enable low osmotic water transport and energy efficient electrodialysis. J. Membr. Sci. 2018, 552, 22–30.
10. Kamcev, J.; Doherty, C.M.; Lopez, K.P.; Hill, A.J.; Paul, D.R.; Freeman, B.D. Effect of fixed charge group concentration on salt permeability and diffusion coefficients in ion exchange membranes. J. Membr. Sci. 2018, 566, 307–316.
11. Ионнообменные мембраны. Перспективы применения полимерных материалов / Э. М. Мовсумзаде, Э. Х. Каримов, Л. Новак [и др.] // Промышленное производство и использование эластомеров. – 2020. – № 3-4. – С. 33-38. – DOI 10.24412/2071-8268-2020-3-4-33-38.
12. Applicability of the modified diatomite for treatment of wastewater containing heavy metals/ D. Boriskov, S. Efremova, N. Komarova [et al.] // E3S Web of Conferences: 2, Online, Virtual, 25–26 февраля 2021 года. – Online, Virtual, 2021. – DOI 10.1051/e3sconf/202124701052.
13. Инженерно-экологическая оценка систем очистки промстоков гальванических производств / Д.Е. Борисков, Н. А. Комарова, А. В. Ажнакина, С.Ю. Ефремова // Экологический мониторинг опасных промышленных объектов: современные достижения, перспективы и обеспечение экологической безопасности населения: Сборник научных трудов по материалам 2-й Всероссийской научно-практической конференции, Саратов, 26–28 октября 2020 года. – Саратов: Общество с ограниченной ответственностью "Амирит", 2020. – С. 30-34.
14. Экологические проблемы гальванических производств / Е. С. Климов, М. Е. Эврюкова, Н. С. Колганова [и др.] // Успехи современного естествознания. – 2004. – № 11. – С. 68-69.
15. Atamanova O.V., Tichomirova E.I., Politayeva N.A., Podolsky A.L., Istrashkina M.V., Innovative technologies for industrial wastewater treatment, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 288 (2019)

Статья поступила в редакцию 13.11.2021

Статья принята к публикации 07.12.2021