Химическая технология

Chemical Technology

DOI: http://doi.org/10.20914/2310-1202-2020-4-227-235 Обзорная статья/Review article
УДК 628.523 Open Access Available online at vestnik-vsuet.ru

Сочетание обратного осмоса и электродиализа для улучшения рекуперации воды в промышленных сточных водах

Мохаммед К. Джубари [1] mohammedqader1983@gmail.com 0000-0002-8070-9647
Надежда В. Алексеева [1] alexejewa.nadja@gmail.com 0000-0002-9335-0477
Мария Ю. Балабанова [2] mariya_balabanova@mail.ru 0000-0002-7126-2863

1 Тамбовский государственный технический университет, ул. Советская, 106, г. Тамбов, 392000, Россия
2 Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, Россия

Аннотация. В статье подробно рассмотрены мембранные процессы обработки сложных систем – обратный осмос (ОО) и мембранный электродиализ (ЭД). В настоящее время разработка технологий очистки промышленных сточных вод вызывает большой интерес у многих исследователей. Это связано с тем, что пищевая, фармацевтическая и химическая промышленность приобретают все большее значение в нашей жизни, одновременно усугубляя одну из самых серьезных экологических проблем – загрязнение окружающей среды промышленными сточными водами, которые содержат вредные вещества в высоких концентрациях. Данная работа посвящена анализу новой технологии извлечения сложных компонентов из промышленных сточных вод, объединяющей обратный осмос и электродиализ. Система обратного осмоса - это управляемые давлением мембранные процессы разделения. В отличие от них, система электродиализа представляет собой электрохимический процесс, который обычно используется в промышленности при нормальном атмосферном давлении. Однако подобные мембранные процессы имеют существенный недостаток – рабочие мембраны загрязняются взвешенными веществами, находящимися в сточных водах, и теряют свою активность. Следовательно, для поддержания активности мембран в течение длительного времени необходима предварительная обработка сточных вод путем удаления взвешенных веществ. Анализ извлеченных компонентов открывает новые перспективы для рекуперации промышленных сточных вод. Существует широкий спектр методов предварительной обработки вод для обратного осмоса и электродиализа. Важным процессом отделения органических и неорганических соединений сточных вод является ультрафильтрация (УФ) с последующим обратным осмосом. В статье рассмотрены некоторые из указанных методов. В заключение следует отметить, что электродиализ демонстрирует замечательные технические преимущества при обработке концентрированного раствора после ОО.

Ключевые слова: электродиализ, предварительная обработка, соль, обратный осмос, сточные воды

A combination of reverse osmosis and electrodialysis to improve water recovery in industrial wastewater

Mohammed Q. Gubari [1] mohammedqader1983@gmail.com 0000-0002-8070-9647
Nadezhda V. Alexejewa [1] alexejewa.nadja@gmail.com 0000-0002-9335-0477
Maria Yu. Balabanova [2] mariya_balabanova@mail.ru 0000-0002-7126-2863

1 Tambov State Technical University, Sovetskaya Str., 106 Tambov, 392000, Russia
2 Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution av, 19, Voronezh, Russia

Abstract. The article discusses in detail the membrane processing of complex systems, reverse osmosis (RO) and electrodialysis (ED) membranes. Currently, the development of industrial wastewater treatment technologies is of great interest to many researchers. This is due to the fact that the food, pharmaceutical and chemical industries are becoming increasingly important in our lives, while exacerbating one of the most serious environmental problems, environmental pollution from industrial wastewater, which contains harmful substances in high concentrations. This study is devoted to the analysis of a new technology for the extraction of complex components from industrial wastewater, combining reverse osmosis and electrodialysis. Reverse osmosis systems are pressure controlled membrane separation processes. In contrast, an electrodialysis system is an electrochemical process that is commonly used industrially under normal atmospheric pressure. However, such membrane processes have a significant drawback, the working membranes are contaminated with suspended substances in the wastewater and lose their activity. Therefore, to maintain the activity of the membranes for a long time, it is necessary to pre-treat wastewater by removing suspended solids. The analysis of the recovered components opens up new perspectives for the recovery of industrial wastewater. There is a wide range of methods for pretreatment of water for reverse osmosis and electrodialysis. Ultrafiltration (UF) followed by reverse osmosis is an important process for separating organic and inorganic compounds from wastewater. This article discusses some of these methods. In conclusion, it should be noted that electrodialysis demonstrates remarkable technical advantages in the treatment of concentrated solution after RO.

Keywords: electrodialysis, pretreatment, salt, reverse osmosis, wastewater

Введение

В настоящее время нехватка воды стала глобальной проблемой. Повторное использование воды, очистка сточных вод и опреснение соленой воды являются важнейшими направлениями получения воды, необходимой для экономического развития. количество воде как промышленного, так и бытового назначения имеет большее значение с учетом целей устойчивого развития [1]. Поверхность Земли примерно на 71%

Для цитирования
Джубари М.К., Алексеева Н.В., Балабанова М.Ю. Сочетание обратного осмоса и электродиализа для улучшения рекуперации воды в промышленных сточных водах // Вестник ВГУИТ. 2020. Т. 82. № 4. С. 227–235. doi:10.20914/2310-1202-2020-4-227-235

For citation
Gubari M.Q., Alexejewa N.V., Balabanova M.Yu. A combination of reverse osmosis and electrodialysis to improve water recovery in industrial wastewater. *Vestnik VGUIT* [Proceedings of VSUET]. 2020. vol. 82. no. 4. pp. 227–235. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2020-4-227-235

© 2021, Джубари М.К. и др. / Gubari M.Q. et al.
This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

покрыта водами океанов, морей, а также льдами. Однако только около 3% воды является пресной и пригодной для питья [2]. Мировое потребление воды значительно возросло, что привело к значительному росту доли населения, проживающего в районах, испытывающих нехватку воды, с 14% в 1900-х годах до примерно 58% в 2000-х годах. По данным Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), в настоящее время около 2,1 миллиарда человек в мире испытывают нехватку чистой питьевой воды, а к 2025 году половина населения Земли, по прогнозам, будет жить в районах с дефицитом воды [3].

Стремительный рост производства в последние десятилетия вызвал серьезные изменения в окружающей среде. Развитие промышленности привело к загрязнению водных ресурсов токсичными загрязнителями, такими как ионы тяжелых металлов, питательные вещества и красители. Добыча и переработка полезных ископаемых, металлургическое производство загрязняют большие объемы воды токсичными тяжелыми металлами, которые весьма стойки и не разлагаются в природе, что оказывает неблагоприятное воздействие на окружающую среду. Поэтому необходима тщательная обработка таких сточных вод перед сбросом в окружающую среду. Традиционно для эффективного и быстрого удаления загрязняющих веществ используются такие методы, как химическое осаждение, коагуляция, осаждение, адсорбция, восстановление, окисление, экстракция растворителем, электролитическая экстракция, испарение, ионный обмен, диализ, электродиализ (ЭД), мембранные процессы и т. д. Эти методы характеризуются высокой себестоимостью, а также ограниченной доступностью [4]. Рассмотрим особенности некоторых методов очистки воды более подробно.

Обзор наиболее распространенных методов очистки вод разного назначения

Предварительная обработка сточных вод, основанная на традиционных методах, очень важна для удаления взвешенных твердых частиц и других крупных частиц. На рисунке 1 показано, что в последнее десятилетие огромный исследовательский интерес представляют мембранные процессы, такие как микрофильтрация (МФ) и ультрафильтрация (УФ). Тем не менее, безусловно, существует настоятельная необходимость перехода к современным методам предварительной обработки мембран, заменяющим традиционные методы [3].

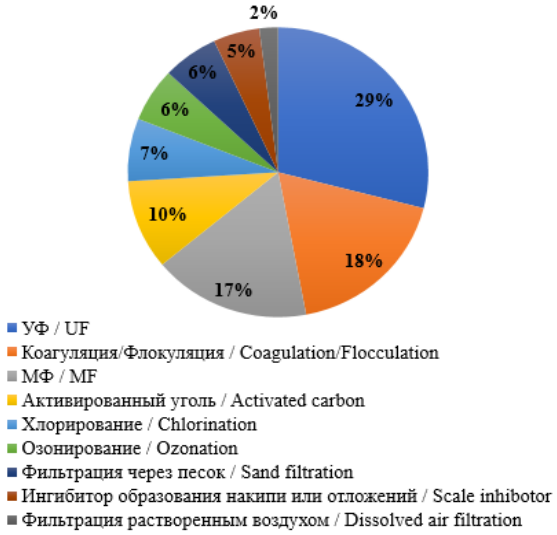


Рисунок 1. Технологии предварительной обработки перед использованием обратного осмоса, применяемые в последнее десятилетие [3]

Figure 1.. Pretreatment technologies before using RO in the last decade [3]

В работе Eisenberg T. и Middle Brooks E. [5] описана обработка питьевой воды обратным осмосом (ОО), показано, что обратный осмос эффективно удаляет широкий спектр загрязняющих веществ. Odegaard H. и Koottatep S. [6] установили, что гуминовые и фульвиновые вещества, которые являются предшественниками тригалометана, в значительной степени удаляются мембранами обратного осмоса. Clair с сотр. [7] обнаружили превосходное удаление (> 95%) растворенного органического углерода из природных вод с помощью мембран FT30. Sorg и др. [8] показали, что система обратного осмоса может эффективно удалять из загрязненной воды радий. Taylor и др. [9] обнаружили, что мембраны обратного осмоса могут быть использованы для удаления 96% растворенного органического углерода, 97% цвета, 97% потенциала образования тригалометана и 96% общей жесткости. Tan L. и Sudak R. [10] исследовали разные типы мембран обратного осмоса и обнаружили, что все они способны приемлемо удалять цвет из подземных вод даже в течение длительного периода эксплуатации.

С другой стороны, электродиализ определяется как процесс мембранного разделения, который использует разность электрических потенциалов в качестве движущей силы для переноса ионов из различных растворов с помощью полупроницаемых мембран. Кроме того, электродиализ – это электрохимический процесс, протекающий при нормальном атмосферном давлении. В отличие от систем обратного осмоса, при электродиализе требуется только насос низкого давления для циркуляции.

В работе Audinos [11] рассмотрено удаление ионов цинка из гальванических сточных вод с помощью электродиализа. Scarazzato и др. [12] испытывали технологию электродиализа для обработки модельных сточных вод из ванны меднения без цианидов. Lu и др. [13] использовали двухступенчатую систему электродеионизации для извлечения из гальванических сточных вод Ni^{2+} и воды. Авторы добились 94% удаления ионов никеля на первой стадии и 96,7% на второй стадии, что составляет 99,8% извлечения Ni^{2+}. Кроме того, Tran и др. [14], оценили комбинированную систему, которая сочетает кристаллизацию и электродиализ на биполярных мембранах, она была создана для удаления ионов кальция и никеля в процессе никелирования.

Ряд исследователей указывают на то, что ЭД является одной из наиболее перспективных технологий обработки концентрированного растворов после ОО [1, 15]. Однако подобных исследований недостаточно, и необходимо дальнейшее изучение деталей этого процесса с учетом полного понимания влияния эксплуатационных параметров и транспорта неорганических и органических соединений через мембраны. Кроме того, образование осадка на мембранах и их загрязнение остаются потенциальными препятствиями в этом процессе. Далее рассмотрим целесообразность электродиализного разделения, концентрированного растворе после ОО для уменьшения объема сброса соленой воды и совершенствования общей регенерации воды с целью получения оборотной воды для промышленных нужд.

Обратный осмос

Процессы мембранного разделения – одни из наиболее важных среди промышленных процессов разделения. Впервые в промышленности мембранные процессы под давлением были использованы в 1960-х годах при опреснении воды обратным осмосом [16]. Установки обратного осмоса часто применяют на химических заводах и машиностроительных предприятиях. В настоящее время этот мембранный процесс находит широкое применение при опреснении морской и слабоминерализованной воды, при очистке бытовых и промышленных сточных вод, при концентрировании пищевых продуктов, производстве сверхчистой воды для полупроводниковой промышленности, и при восстановлении важных материалов в химической и нефтехимической промышленности [17]. Кроме того, обратный осмос получил повсеместное признание как в очистке воды, так и в ее опреснении [18].

Обратный осмос – это управляемый давлением мембранный процесс разделения, который широко применяются в промышленности [19]. Мембраны обратного осмоса могут быть использованы для обессоливания и удаления растворенных органических веществ при одновременном снижении общего органического углерода, химического потребления кислорода (ХПК) и биологического потребления кислорода (БПК) [16]. Кроме того, обратный осмос – интересный процесс, поскольку он прост, может быть использован для решения широкого спектра задач, экономически конкурентоспособен и не нуждается в изменениях фазы [20]. Однако в применении обратного осмоса существуют и некоторые недостатки. Один из них – необходимость очистки концентрированных сточных вод из-за их высокой солености. Традиционно концентрат обратного осмоса сбрасывается в природный водоем (с разбавлением или без разбавления, в зависимости от местных правил сброса, чтобы избежать деградации водного объекта) или выпаривается. Первый способ не является экологически чистым, а второй процесс весьма затратен (когда для выпаривания используется традиционный источник энергии, потенциально еще менее экологически чистый) [17]. Поэтому для решения этих проблем необходимо комбинировать обратный осмос с другими технологиями.

В отличие от мембран для микрофильтрации и ультрафильтрации мембраны для обратного осмоса – это мембраны, которые имеют поре с наименьшим размером. Это процесс, управляемый давлением (от 20 до 80 МПа), удаляет из растворов мельчайшие загрязнения и одновалентные ионы (<350 Да) [21]. Было показано, что эта технология удобна и может обеспечить высокую эффективность удаления при очистке широкого спектра сточных вод, хотя и имеет очень строгие требования к поступающей на очистку воде в отношении концентрации взвешенных веществ, волокон и маслянистых компонентов [22, 23]. Мембраны, используемые в установке обратного осмоса, позволяют удерживать органические соединения и ионы. Крупные компоненты будут удерживаться, но их удаляют во время предварительной обработки, поскольку они могут серьезно загрязнить устройство обратного осмоса [24]. В таблице 1 приведены преимущества и недостатки широко используемых традиционных методов предварительной обработки с предлагаемыми усовершенствованиями [3].

Таблица 1.

Общепринятые методы предварительной обработки вод для обратного осмоса, их преимущества, недостатки и предлагаемые усовершенствования [3]

Table 1.

Common conventional reverse osmosis pretreatment techniques and their advantages, disadvantages and suggested improvements [3]

Метод Technique	Преимущества Advantages	Недостатки Disadvantages	Предлагаемые усовершенствования Suggested improvements
Коагуляция/ флокуляция Coagulation/ flocculation	Значительно удаляет коллоидные и твердые частицы. Контролирует органическое, коллоидное и биообрастание. Significantly enhances the removal of colloidal and particulate matters. Controls organic, colloidal and biofouling.	Передозировка коагулянтов и флокулянтов может оказать вредное воздействие на мембраны. Канцерогенный потенциал мономеров, используемых для синтеза синтетических органических коагулянтов. Не эффективен в ингибировании органического обрастания. Overdosing of the coagulants and flocculants can cause detrimental effects on the membranes. Carcinogenic potential of the monomers used for the synthesis of synthetic organic coagulants. Not effective in inhibiting organic scaling.	Использование экологически чистых природных коагулянтов для снижения вредного воздействия синтетических полимеров на окружающую среду. Усовершенствование автоматизированного моделирования и внедрение передовых тестов для быстрого прогнозирования изменений поступающей морской воды. Use of environmentally friendly, natural coagulants to reduce the detrimental ecological impact of synthetic polymers. Improvements in automated modelling and incorporation of advanced tests for a prompt prediction in fluctuations of incoming seawater.
Хлорирование Chlorination	Эффективное дезинфицирующее средство для уничтожения микроорганизмов и других бактерий. Ослабляет неприятный запах. Effective disinfectant for destructing microorganisms and other bacteria. Reduces odor.	Эффективность хлора в дезактивации простейших и эндоспор невелика. Полиамидные мембраны обратного осмоса чувствительны к воздействию хлора. Применение хлорирования сопровождается образованием канцерогенных дибутилфталатов. The effectiveness of chlorine in deactivating protozoa and endospores is poor. Polyamide reverse osmosis membranes susceptible to attack by chlorine. The use of chlorination is accompanied by the formation of carcinogenic dibutyl phthalates.	Использование диоксида хлора вместо свободного хлора для снижения дибутилфталатов. Разработка новых устойчивых к хлору мембран обратного осмоса. Use of chlorine dioxide instead of free chlorine to decrease the dibutyl phthalates. New developments are necessary for chlorine resistant reverse osmosis membranes.
Фильтрация Filtration	Способность фильтровать воду с высокой мутностью и взвешенными твердыми веществами. Фильтрация на многослойных диэлектрических тонкоплёночных фильтрах обеспечивает длительный период и высокую скорость фильтрации. Напорные фильтры для небольших установок обратного осмоса морской воды занимают мало места, легки и быстры в установке. Ability to filter water with high turbidity and suspended solids. Filtration on multilayer dielectric thin film filters provides a long period and high filtration rate. Pressure filters for small seawater reverse osmosis plants take up little space, are easy and quick to install.	Чувствительна к изменениям поступающей воды. Индекс плотности взвешенных частиц в единице объема воды может варьироваться на несколько единиц во время цветения водорослей и загрязнения нефтью. Не эффективна для ингибирования органического и биообрастания. Фильтрованная диметилформамид (ДМФ) морская вода может иметь высокий потенциал загрязнения для картриджных фильтров, которые могут нуждаться в замене каждые 2–8 недель. Неоптимизированный ДМФ может привести к частой химической очистке мембран обратного осмоса. Sensitive to feed water changes. The density index of suspended solids per unit volume of water can vary by several units during algal blooms and oil contamination. Not effective for inhibiting organic and biofouling. Dimethylformamide (DMF) filtered seawater may have high fouling potential for cartridge filters which might need replacement every 2–8 weeks. Non-optimized DMF may lead to frequent chemical cleaning of reverse osmosis membranes.	Оптимизация диметилформамид (ДМФ), которая позволяет снизить эксплуатационные и энергетические затраты и увеличить срок службы картриджного фильтра. Для ДМФ должны быть установлены надлежащие конструктивные и эксплуатационные параметры в отношении органического и биообрастания. Optimization of dimethylformamide (DMF) which can reduce operational and energy costs and increase the cartridge filter lifetime. A proper design and operational parameters should be established for DMF in relation to organic and biofouling.

Озонирование Ozonation	Не вызывает проблем со вкусом или запахом. Does not cause taste or odor problems.	Образование бромата, известного канцерогена, в водах, содержащих бромид. Должно выполняться на месте из-за проблем с хранением. Трудно контролировать. Formation of bromate, a known carcinogen, in waters containing bromide. Needs to be produced on-site due to its storage problems. Difficult to monitor.	Обширные исследования в области передовых методов озонирования, таких как электропероксон, и выбор катодных материалов для максимального удаления органического углерода. Extensive research in the areas of advanced ozonation methods such as electro-peroxone and their selection of cathode materials to maximize organic carbon removal.
Ультразвук Ultrasound	Свободные химические технологии. Возможность использования в высоко дисперсных твердых растворах. Free-chemical technique. Ability to be used with high suspended solid solutions.	Высокая стоимость. Требования к охлаждению. High cost. Cooling requirements.	Сочетание ультразвука с другими методами позволяет повысить эффективность технологического процесса и снизить энергозатраты. Combination of ultrasound with other techniques to increase process efficiency and lowering energy demands.
Ультрафиолетовое излучение Ultraviolet light radiation	Эффективен при дезактивации спор. Низкая стоимость. Легко реализовать. Effective in deactivating spores. Low cost. Easy to implement.	Является мутагеном. Слабое рассеяние света в воде. Разрушает крупные органические молекулы до органических кислот с последующим образованием биопленки. Mutagenic activity. Low performance in light scattering water. Breaks down large natural organic matter into organic acids for subsequent biofilm formation.	Чувствительность микроорганизмов к ультрафиолету требует особого внимания. Сочетание УФ-излучения с другими традиционными для обратного осмоса методами требует проведения дополнительных технико-экономических обоснований. The sensitivity of microorganisms to ultraviolet light requires special attention. Combining UV radiation with other conventional RO methods requires additional feasibility studies.

Таблица 2.

Промышленное применение традиционного электродиализа [31]

Table 2.

Industrial applications of conventional electrodialysis [31]

Промышленное применение Industrial applications	Устройство камеры и технологический процесс Stack and process design	Статус применения Status of application	Ограничения limitations	Ключевые прблемы Key problems
Опреснение слабоминерализованной воды Brackish water desalination	Плёночное течение, сложное устройство камеры, обратная полярность Sheet flow, tortuous path stack, reverse polarity	Коммерческое Commercial	Концентрация подаваемой воды и тип ионов Concentration of feed and ions	Стоимость Cost
Подготовка воды для котлов Boiler feedwater production			Качество и стоимость произведенной воды Product water quality and costs	
Очистка сточных и технологических вод Waste and process water treatment	Аппарат с пленочным режимом течения, однонаправленный Sheet flow stack, unidirectional		Свойства мембран Membrane properties	Обрастание мембран Membrane fouling
Деминерализация пищевых продуктов Demineralization of food products	Аппарат с пленочным режимом течения или сложное устройство камеры, однонаправленный Sheet flow or tortuous path stack, unidirectional	Коммерческое (испытательный период) Commercial (trial period)	Селективность мембран и стоимость Membrane selectivity and costs	Обрастание мембран, потеря продукта Membrane fouling, product loss
Производство поваренной соли Table salt production	Аппарат с пленочным режимом течения, однонаправленный Sheet flow stack, unidirectional	Коммерческое Commercial	Стоимость Cost	Обрастание мембран Membrane fouling

Большинство коммерческих композитных мембран обратного осмоса созданы на основе полиамида, в то время как возможно применение и других композитных мембран (например, сульфированный полисульфон) [25]. Заряженные полимерные мембраны играют важную роль в разделении жидкостей, очистке воды, рекуперации отходов, очистке промышленных продуктов, производстве возобновляемой энергии и сохранении энергии [26]. Кроме того, тонкопленочные композитные мембраны обратного осмоса на основе ароматических полиамидов широко используются в области опреснения морской воды и очистки сточных вод благодаря их относительно хорошей химической стабильности и высокой способности удалять примеси из воды такие примеси, как соли и растворенные органические соединения [27].

Электродиализ

Электродиализ – это процесс электрохимического разделения, в котором заряженные мембраны применяются для отделения ионов из смешанного водного раствора под действием разности электрических потенциалов. Он получил широкое применение не только при опреснении природных вод, опреснении солевых растворов и производстве поваренной соли, но и при разделении органических кислот и их солей в процессах биоразделения [2]. Электродиализ имеет ряд преимуществ, таких как высокая степень извлечения воды и высокий коэффициент опреснения. Кроме того, его применение в промышленных масштабах было ограничено из-за ограниченного выбора ионообменных мембран, что приводит к высокому энергопотреблению. Это связано с тем, что используемые вначале ионообменные мембраны были гетерогенными, обладающими высоким площадным сопротивлением и плохой перм-селективностью. Он не является экономически конкурентоспособным по сравнению с другими технологиями опреснения, такими как обратный осмос, многоступенчатый метод мгновенного вскипания и метод многоступенчатого испарения. Однако с развитием гомогенных мембран указанные выше недостатки в большей степени были устранены [1].

Более того, многие исследователи сообщают, что ЭД является одной из наиболее перспективных технологий обработки концентрированных растворов [28]. Так, в химической и пищевой промышленности электродиализ использовался для концентрирования растворов с целью извлечения ценных солей или рассольных продуктов и получения химических продуктов [29]. В основном электродиализ используется для опреснения солевых растворов, таких как слабоминерализованная вода. Но все большее значение приобретают и другие области применения, такие как очистка промышленных сточных вод, деминерализация молочной сыворотки и обезвоживание фруктовых соков [30].

Некоторые из наиболее важных промышленных применений традиционного электродиализа, а также конструкция камеры и схема технологического процесса, а также основные ограничения перечислены в таблице 2[31].

Кроме того, проектирование и эксплуатация процесса электродиализа основаны на комплексе фиксированных и переменных параметров, таких как устройство камеры, концентрация сырья и продукта, свойства мембран, скорость потока, плотность тока, скорость восстановления и т. д. [32].

Электродиализатор включает в себя ионообменные мембраны (катион- и анионобменные), прокладки и пару электродов (анод и катод). Мембраны и прокладки располагаются между двумя электродами. Для разделения потоков концентрата и разбавленного раствора между мембранами устанавливают пластиковые сепараторы. Принципиальная схема устройства электродиализатора приведена на рисунке 2 [33].

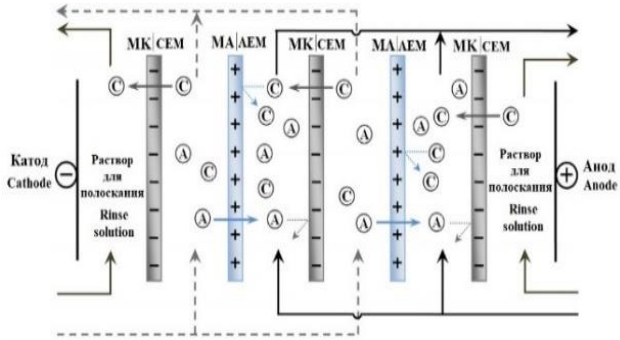


Рисунок 2. Устройство электродиализатора

Figure 2.. ED cell setup

Проектирование системы

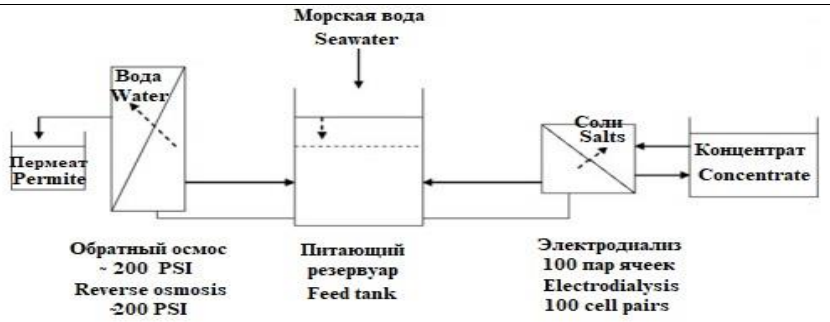
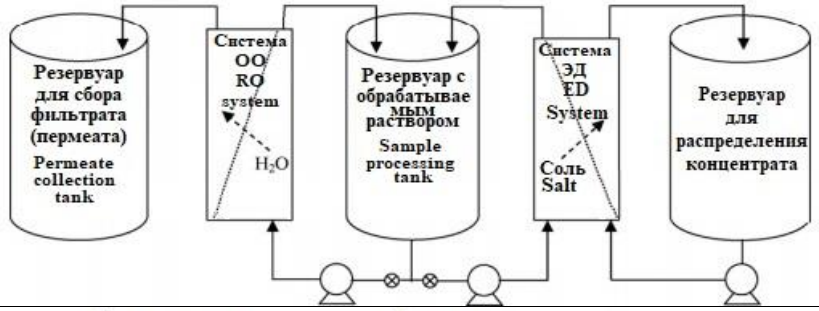
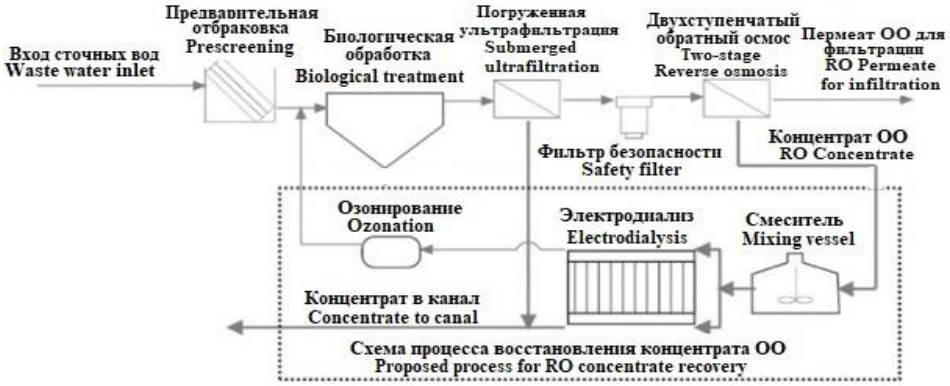
На блок-схемах в таблице 3 приведены некоторые аспекты проектирования процессов обратного осмоса/ электродиализа. Эти схемы идентичны для промышленных и лабораторных процессов.

Таблица 3.

Принципиальные схемы установок, сочетающих процессы обратного осмоса и электродиализа

Table 3.

Schematic diagram of the installation of RO / ED processes

Блок-схема	Ссылка
	[34]
	[35]
	[1]

В исследовании Vetter с сотр. [34] показана базовая технологическая схема процесса ОО/ЭД. Эта блок-схема идентична для реальных и лабораторных условий. Система присоединяется к резервуару с морской водой. Она включает в себя как процессы электродиализа, так и процессы обратного осмоса. При этом сначала для анализа отбирались образцы свежей морской воды. Затем морская вода перекачивалась в резервуары. Однако во время перекачки из резервуаров-накопителей в резервуар системы ОО/ЭД морскую воду предварительно обрабатывали через полипропиленовые фильтры для удаления твердых частиц. Удельная электропроводность измерялась непосредственно с помощью портативных термокомпенсированных кондуктометров. Ток и напряжение, приложенные к электродиализатору, соответствовали применяемым источникам питания. Кроме того, расход воды определялся волюмометрически.

Gurtler с сотр. [35] описали базовую технологическую схему связанной системы ОО/ЭД. Было показано, что морская вода может быть переработана в резервуаре, который соединен через запорные клапаны с насосами, подающими воду как в систему ОО, так и в систему ЭД. Запорные клапаны регулируют подачу воды. Во время начальной фазы ЭД образец циркулировал только в системе ЭД или в обеих системах. Во время ОО/ЭД фазы образец циркулировал в обеих системах – ОО и ЭД. Во время заключительной фазы ЭД образец циркулировал только в системе ЭД. Кроме того, во время фазы ОО/ЭД система ОО находилась под давлением для удаления воды, которая подавалась в сборный резервуар для фильтрата. Фильтрат

собирали и повторно использовали для разбавления концентрированных растворов, приготовления реагентов и др.

В исследовании Zhang и др. [1] отмечено существенное улучшение качества воды, обработанной в процессе ОО, если концентрат от ОО обрабатывать на электродиализаторе и продукт, т. е. обессоленный раствор от ЭД, повторно вводить в процесс биологической очистки. Предлагаемая процедура показана на блок-схеме: концентрат ОО поступает в смесительный сосуд с кислотой для удаления осадка, затем он перекачивается в электродиализатор для обессоливания. Продукт ЭД (разбавленный) озонируется перед повторным введением в процесс биологической очистки. ЭД-рассол (концентрат) смешивается с концентратом от ультрафильтрации в соответствии с нормативами и сбрасывается.

Таким образом, для очистки промышленных сточных вод в технологическом процессе следует объединять ОО и ЭД. Ожидается, что это позволит значительно повысить эффективность и скорость рекуперации промышленных сточных вод после предварительной обработки сточных вод по традиционной мембранной технологии.

Заключение

Для опреснения морской и солоноватой воды, очистки бытовых и промышленных сточных вод широко применяется технология обратного осмоса. Для тех же целей применяется и электродиализ, преимуществами которого являются высокая рекуперация воды и высокая скорость опреснения. Показана целесообразность использования ЭД для обработки стоков ОО.

Поскольку производительность процессов ОО и ЭД зависит от состава сточных вод, этим процессам предшествует предварительная очистка, основанная на традиционном мембранном разделении. Важным методом удаления органических и неорганических соединений из сточных вод является ультрафильтрация с последующим обратным осмосом и электродиализом концентрата ОО. Эти методы позволяют существенно экономить природные ресурсы, возвращая в систему очищенные промышленные сточные воды.

Достижению максимальной рекуперации способствуют такие эксплуатационные параметры, как плотность тока, режим работы, тип мембран и исходный состав сточных вод.

References

1 Zhang Y., Ghyselbrecht K., Meesschaert B., Pinoy L. et al. Electrodialysis on RO concentrate to improve water recovery in wastewater reclamation. Journal of Membrane Science. 2011. vol. 378. no. (1-2). pp. 101–110.

2 Mohammadi T., Kaviani A. Water shortage and seawater desalination by electrodialysis. Desalination. 2003. vol. 158. pp. 267–270.

3 Anis S.F., Hashaikeh R., Hilal N. Reverse osmosis pretreatment technologies and future trends: A comprehensive review. Desalination. 2019. vol. 452. pp. 159–195.

4 Thaçi B.S., Gashi S.T. Reverse Osmosis Removal of Heavy Metals from Wastewater Effluents Using Biowaste Materials Pretreatment. Pol. J. Environ. Stud. 2019. vol. 28. no. 1. pp. 337–341.

5 Al-Jlil S. Performance of Nano-Filtration and Reverse Osmosis Processes for Wastewater Treatment. Materials and technology. 2017. vol. 51. no. 3. pp. 541–548.

6 Ødegaard H., Koottatep S. Removal of humic substances from natural waters by reverse osmosis. Water Research. 1982. vol. 16. no. 5. pp. 613–620.

7 Clair T., Kramer J., Sydo M., Eaton D. Concentration of aquatic dissolved organic matter by reverse osmosis. Water Research. 1991 vol. 25. no. 9. pp. 1033–1037.

8 Sorg T., Forbes R. Chambers D. Removal of radium-226 from sarasota county, fla., drinking water by reverse osmosis. Journal AWWA. 1980. vol. 72. no. 4. pp. 230–237.

9 Taylor J., Thompson D., Carswell J. Applying membrane processes to groundwater sources for Trihalomethane precursors. Journal AWWA. 1987. vol. 79. no. 8. pp. 72–82.

10 Tan L., Sudak R. Removing color from a groundwater source. Journal AWWA. 1992. vol. 84. no. 1. pp. 79–87.

11 Audinos R. Improvement of metal recovery by electrodialysis. Journal of Membrane Science. 1986. vol. 27. no. 2. pp. 143–154.

12 Scarazzato T., Buzzi D.C., Bernardes A.M., Romano Espinosa D.C. Treatment of wastewaters from cyanide-free plating process by electrodialysis. J. Clean. Prod. 2015. vol. 91. pp. 241–250.

13 Lu H., Wang Y., Wang J. Recovery of Ni2+ and pure water from electro- plating rinse wastewater by an integrated two-stage electrodeionization process. J. Clean. Prod. 2015. vol. 92. pp. 257–266.

14 Tran A.T.K., Mondal P., Lin J., Meesschaert B. et al. Simultaneous regeneration of inorganic acid and base from a metal washing step wastewater by bipolar membrane electrodialysis after pretreatment by crystallization in a fluidized pellet reactor. J. Memb. Sci. 2015. vol. 473. pp. 118–127.

15 Korngold E., Aronov L., Daltrophe N. Electrodialysis of brine solutions discharged from an RO plant. Desalination. 2009. vol. 242. no. (1-3). pp. 215–227.

16 Li N.N., Fane A.G., Ho W.S.W., Matsuura T. Advanced Membrane Technology and Applications. Hoboken, NJ, John Wiley & Sons. Inc, 2008.

17 Ghernaout D. Reverse Osmosis Process Membranes Modeling – A Historical Overview. Journal of Civil, Construction and Environmental Engineering. 2017. vol. 2. no. 4. pp. 112–122.

18 Malaeb L. Ayoub G.M. Reverse osmosis technology for water treatment: State of the art review. Desalination. 2011. vol. 267 no. 1 pp. 1–8.

19 Niewersch C., Rieth C., Hailemariam L., Oriol G.G. et al. Reverse osmosis membrane element integrity evaluation using imperfection model. Desalination. 2020. vol. 476. pp. 112–122.

20 Anqi A.E., Alkhamis N., Oztekin A. Numerical simulation of brackish water desalination by a reverse osmosis membrane. Desalination. 2015. vol. 369. pp. 156–164.

21 De Morais Coutinho C., Chiu M.C., Basso R.C., Ribeiro A.P.B. et al. State of art of the application of membrane technology to vegetable oils: A review. Food Research International. 2009. vol. 42. no. (5–6). pp. 536–550.

22 Lee K.P., Arnot T.C., Mattia D. A review of reverse osmosis membrane materials for desalination—Development to date and future potential. Journal of Membrane Science. 2011. vol. 370. no. (1–2). pp. 1–22.

23 Bódalo-Santoyo A., Gómez-Carrasco J.L., Gómez-Gómez E., Máximo-Martín F. et al. Application of reverse osmosis to reduce pollutants present in industrial wastewater. Desalination. 2003. vol. 155. no. 2. pp. 101–108.

24 Urtiaga A.M., Pérez G., Ibáñez R., Ortiz I. Removal of pharmaceuticals from a WWTP secondary effluent by ultrafiltration/reverse osmosis followed by electrochemical oxidation of the RO concentrate. Desalination. 2013. vol. 331. pp. 26–34.

25 Drioli E., Giorno L. Membrane Operations: Innovative Separations and Transformations. Weinheim, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2009.

26 Kingsbury R.S., Wang J., Coronell O. Comparison of water and salt transport properties of ion exchange, reverse osmosis, and nanofiltration membranes for desalination and energy applications. Journal of Membrane Science. 2020. vol. 604. pp. 117998.

27 Liu M., Yu C., Dong Z., Jiang P. et al. Improved separation performance and durability of polyamide reverse osmosis membrane in tertiary treatment of textile effluent through grafting monomethoxy-poly(ethylene glycol) brushes. Separation and Purification Technology. 2019. vol. 209. pp. 443–451.

28 Sakar H., Balcik Canbolat C., Karagunduz A., Keskinler B. Sulfate removal from nanofiltration concentrate of alkaloid wastewater by electrodialysis. Desalination and Water Treatment. 2015. vol. 46. pp.1–12.

29 Bond R., Batchelor B., Davis T., Klayman B. Zero Liquid Discharge Desalination of Brackish Water with an Innovative Form of Electrodialysis: Electrodialysis Metathesis. Florida Water Resources Journal. 2011. pp. 38-42.

30 Strathmann H. Membrane Separations | Electrodialysis. Encyclopedia of Separation Science. 2000. pp. 1707-1717.

31 Strathmann H. Chapter 6 Ion-Exchange Membrane Processes in Water Treatment. Sustainability Science and Engineering. 2010. vol. 2. pp. 141–199.

32 Lee H.-J., Sarfert F., Strathmann H., Moon S.-H. Designing of an electrodialysis desalination plant. Desalination. 2002. vol. 142. no. 3. pp. 267–286.

33 Ben Sik Ali M., Mnif A., Hamrouni B., Dhahbi M. Desalination of brackish water using electrodialysis: Effect of operational conditions. Journal of Materials Protection. 2009. vol. 50. pp. 141-146.

34 Vetter T., Perdue E., Ingall E., Koprivnjak J. et al. Combining reverse osmosis and electrodialysis for more complete recovery of dissolved organic matter from seawater. Separation and Purification Technology. 2007. vol. 56 no. 3. pp. 383–387.

35 Gurtler B.K., Vetter T.A., Perdue E.M., Ingall E. et al. Combining reverse osmosis and pulsed electrical current electrodialysis for improved recovery of dissolved organic matter from seawater. Journal of Membrane Science. 2008. vol. 323. no. 2. pp. 328–336.

Сведения об авторах

Мохаммед К. Джубари аспирант, кафедра технологических процессов, аппаратов и техносферной безопасности, Тамбовский государственный технический университет, ул. Советская, 106, г. Тамбов, 392000, Россия, mohammedqader1983@gmail.com
https://orcid.org/0000-0002-8070-9647

Надежда В. Алексеева доцент, кафедра технологических процессов, аппаратов и техносферной безопасности, Тамбовский государственный технический университет, ул. Советская, 106, г. Тамбов, 392000, Россия, alexejewa.nadja@gmail.com
https://orcid.org/0000-0002-9335-0477

Мария Ю. Балабанова старший преподаватель, кафедра промышленной экологии, оборудования химических и нефтехимических производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, Россия, mariya_balabanova@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-7126-2863

Information about authors

Mohammed Q. Gubari graduate student, technological processes devices and technosphere safety department, Tambov State Technical University, Sovetskaya Str., 106 Tambov, 392000, Russia, mohammedqader1983@gmail.com
https://orcid.org/0000-0002-8070-9647

Nadezhda V. Alexejewa associate professor, technological processes devices and technosphere safety department, Tambov State Technical University, Sovetskaya Str., 106 Tambov, 392000, Russia, alexejewa.nadja@gmail.com
https://orcid.org/0000-0002-9335-0477

Maria Yu. Balabanova senior lecturer, industrial ecology, equipment for chemical and petrochemical plants, Voronezh State University of Engineering Technologies disabled, Revolution av, 19, Voronezh, Russia, mariya_balabanova@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-7126-2863

Вклад авторов

Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат

Contribution

All authors are equally involved in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 12/11/2020	**После редакции** 20/11/2020	**Принята в печать** 30/11/2020
Received 12/11/2020	**Accepted in revised** 20/11/2020	**Accepted** 30/11/2020