

ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Научная статья

УДК 544.6.018.2

doi: 10.17308/sorpchrom.2025.25/13046

Возможности генерации электрической энергии методом обратного электродиализа с использованием новых российских катионообменных мембран

Анастасия Викторовна Клевцова¹, Елизавета Сергеевна Коржова²,
Анна Сергеевна Кириченко³, Ксения Андреевна Кириченко^{1✉}

¹Кубанский государственный университет, Краснодар, Россия, ksenia8kirichenko@gmail.com ✉

²Краснодарский компрессорный завод, Краснодар, Россия

³Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина, Краснодар, Россия

Аннотация. Обратный электродиализ – это развивающийся метод генерации возобновляемой электрической энергии из энергии градиента солесодержания с использованием ионообменных мембран. Для улучшения перспектив внедрения обратного электродиализа требуется создание новых мембран, соответствующих требованиям стоимости, электропроводности и селективности, и совершенствование конструкции установок для устранения паразитных токов. Предметом исследования была проверка возможности генерации электрической энергии методом обратного электродиализа с использованием новых катионообменных мембран и установки, отличающейся от обычно используемых для обратного электродиализа отсутствием внутренних коллекторов раствора. Целью работы было исследование генерации электрической энергии методом обратного электродиализа с использованием мембранного пакета, содержащего катионообменные мембраны производства Краснодарского компрессорного завода и анионообменные мембраны производства Fujifilm. Для этого в установку подавали более разбавленный раствор, содержащий 0.1 г/дм³ NaCl, что имитировало солесодержание речной воды, и один из двух вариантов более концентрированного раствора; в первом варианте более концентрированный раствор содержал 10 г/л NaCl, что имитировало солесодержание морской воды, а во втором варианте для проверки влияния присутствия полизарядных ионов более концентрированный раствор одновременно содержал 9 г/дм³ NaCl и 1.215 г/дм³ Na₂SO₄. Методом варьирования сопротивления внешней нагрузки и регистрации значений скачка потенциала между концевыми электродами и силы тока во внешней цепи определяли зависимость генерируемой мощности от силы тока во внешней цепи. В результате было показано, что не содержащая внутренних коллекторов раствора установка с мембранным пакетом, включающим новые катионообменные мембраны, действительно способна генерировать электрическую энергию, что присутствие полизарядных ионов ожидаемо снижает генерируемую мощность и скачок потенциала, однако во всех случаях максимальный скачок потенциала между электродами оказался существенно ниже ожидаемого исходя из расчетных диффузионных потенциалов, а максимальная генерируемая мощность – существенно ниже достижимой на текущем уровне развития техники. Можно заключить, что одного лишь перехода к схеме, не содержащей внутренних коллекторов раствора, недостаточно для повышения эффективности установок, и перспективным становится пересмотр конструкции и сравнение свойств новых мембран с аналогами в устройствах, позволяющих лучше продемонстрировать их возможные преимущества.

Ключевые слова: ионообменная мембрана, обратный электродиализ, возобновляемые источники энергии, энергия градиента солесодержания.

Благодарности: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда и Кубанского научного фонда № 24-29-20175. Авторы выражают благодарность за помощь и содействие председателю совета директоров ООО «Краснодарский компрессорный завод» И.В. Ворошилову.

Для цитирования: Клевцова А.В., Коржова Е.С., Кириченко А.С., Кириченко К.А. Возможности генерации электрической энергии методом обратного электродиализа с использованием новых российских катионообменных мембран // Сорбционные и хроматографические процессы. 2025. Т. 25, № 3. С. 363-372. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2025.25/13046>

Original article

Possibilities of electricity generation by reverse electrodialysis using novel russian cation exchange membranes

Anastasiia V. Klevtsova¹, Elizaveta S. Korzhova²,

Anna S. Kirichenko³, Ksenia A. Kirichenko^{1✉}

¹Kuban State University, Krasnodar, Russian Federation, ksenia8kirichenko@gmail.com✉

²Krasnodar Compressor Plant LLC, Krasnodar, Russian Federation

³Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin, Krasnodar, Russian Federation

Abstract. Reverse electrodialysis is an emerging method of generating renewable electrical energy from salinity gradient energy using ion exchange membranes. Improving the prospects for the implementation of reverse electrodialysis requires the development of novel membranes that meet the requirements of cost, conductivity and selectivity, and improvement of plant design to eliminate ionic shortcut currents. The subject of the study was determination of the possibility of generating electrical energy by reverse electrodialysis using novel cation exchange membranes and a cell that differs from those commonly used for reverse electrodialysis by the absence of internal manifolds. The aim of the work was to study the generation of electrical energy by reverse electrodialysis using a membrane stack containing cation exchange membranes produced by Krasnodar Compressor Plant and anion exchange membranes produced by Fujifilm. A more dilute solution contained 0.1 g/L NaCl simulating the salinity of river water, and one of the two variants of the composition of more concentrated solution were fed into the cell; in the first variant, the more concentrated solution contained 10 g/L NaCl, simulating the salinity of seawater, and in the second variant, the more concentrated solution simultaneously contained 9 g/L NaCl and 1.215 g/L Na₂SO₄ to test the effect of the presence of polycharged ions. By varying the resistance of the external load and recording the values of the potential drop between the end electrodes and the current in the external circuit, the dependence of the generated power on current in the external circuit was determined. As a result, it was shown that the cell not containing internal manifolds equipped with a membrane stack that included novel cation exchange membranes can be used to generate electric power, that the presence of polycharged ions reduces the generated power and potential drop as expected, but in all cases the maximum potential drop between the electrodes was significantly lower than the one calculated from the diffusion potentials, and the maximum generated power was significantly lower than achievable by state-of-the-art cells. It can be concluded that a mere transition to the scheme without internal solution collectors is not enough to improve the efficiency of the plants, and it is promising to revise the design and compare the properties of new membranes with analogs in devices that can better demonstrate their possible advantages.

Keywords: ion exchange membrane, reverse electrodialysis, renewable energy, salinity gradient power

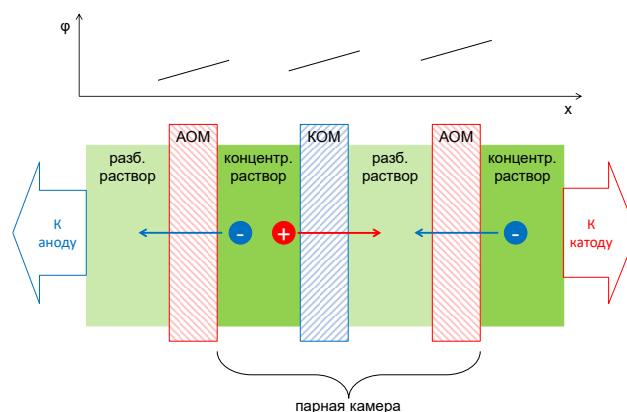
Acknowledgments: the research was carried out at the expense of a grant from the Russian Science Foundation and the Kuban Science Foundation No. 24-29-20175. The authors would like to thank I.V. Voroshilov, Chairman of the Board of Directors of Krasnodar Compressor Plant LLC, for his help and assistance.

For citation: Klevtsova A.V., Korzhova E.S., Kirichenko A.S., Kirichenko K.A. Possibilities of electricity generation by reverse electrodialysis using novel Russian cation exchange membranes. *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*. 2025. 25(3): 363-372. (In Russ.). <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2025.25/13046>

Введение

Доля возобновляемых источников на рынке генерации электрической энергии растет, и в случае Китая, обладающего, помимо огромных запасов ископаемого топлива, огромными производственными возможностями, генерация из возобновляемых источников позволяет покрыть более 25% энергопотребления [1]. Ис-

пользование возобновляемых источников особенно перспективно для регионов с подходящими климатическими условиями и перебоями центрального электроснабжения или его недоступностью; к примеру, для мест впадения рек в моря обсуждается использование энергии градиента солесодержания между более разбавленными и более концентрированным



АОМ – анионообменная мембрана, КОМ – катионообменная мембрана

Рис. 1. Состав парной камеры установки для обратного электродиализа. Приведено направление основных потоков ионов и упрощенно показано возрастание электрического потенциала при увеличении количества мембран.

Fig. 1. Composition of the cell pair of the reverse electrodialysis unit. The direction of the main ion fluxes is given and the mechanism of growth of electric potential with increasing number of membranes is provided in simplified form.

ными растворами, практически доступной при трансформации энергии разности химических потенциалов в другие виды энергии. Мощность, которую теоретически можно извлечь при внедрении генерирующих установок во всех эстуариях мира, оценивается в 2.6 ТВт, а также 15000 ТВтч/год, а энергия, доступная для практического извлечения, оценивается в 625 ТВтч/год, что эквивалентно 3% мирового потребления [2].

Существуют два основных подхода к извлечению энергии градиента солесодержания. Первый – это осмотическая энергостанция, в которой растворы разделяет проницаемая только для растворителя мембрана, и в процессе осмоса возникает избыточное гидростатическое давление со стороны более концентрированного раствора, которое можно использовать для вращения турбины [3,4]. Вторым подходом является рассматриваемый в данной работе обратный электродиализ [5]. В нем более концентрированный и более разбавленный раствор, разделенные проницаемыми только для ионов определенного знака заряда монополярными ионообменными мембранами, образуют повторяющуюся парную камеру. Вызванное диффузией движение

ионов через мембраны формирует диффузионный скачок потенциала. Очень упрощенная схема формирования диффузионных потенциалов и суммарного электродного потенциала приведена на рис. 1; детальное рассмотрение, учитывающее скачок потенциала на межфазных границах и падение потенциала в различных слоях раствора, приведено в статье [6]. Поддержание электронейтральности в двух конечных, электродных, камерах вызывает протекание электродных реакций, обеспечивающих движение электронов во внешней цепи.

Несмотря на большой теоретический потенциал градиента солёности как возобновляемого источника энергии, на настоящий момент широкому внедрению процесса препятствует ряд вопросов, включающих низкий ток/съем с единицы площади мембран и их высокую стоимость, высокое омическое сопротивление мембран и потери генерируемой мощности в результате внутренних перетоков ячейки и прямого смешения растворов [7], а также снижение удельной мощности в присутствии двухвалентных ионов [8]. Для решения части возникающих вопросов можно адаптировать знания, полученные в результате изучения процесса обессоливания, концентрирования и

фракционирования растворов методом электродиализа, история которого насчитывает многие десятилетия [9-11]. Примерами вопросов, актуальных как для электродиализа, так и для обратного электродиализа, являются математическое описание массопереноса в каналах сложной геометрии [12,13], перенос слабых электролитов через ионообменные мембраны [14-16], изменение свойств мембран в присутствии природных органических веществ [17,18].

Для снижения внутренних потерь на утечки растворов необходимо изменять конструкцию используемых аппаратов, к примеру, использовать схему без внутренних коллекторов растворов, что аналогично используемому в электродиализе подходу [19], и продолжать исследования в области создания новых мембран. Ионообменные мембраны, предназначенные для обратного электродиализа, должны обладать рядом трудносочетаемых свойств. Для минимизации внутренних омических потерь мембраны должны быть тонкими и иметь низкое удельное сопротивление. Это затрудняет применение ряда гетерогенных мембран, толщина которых составляет приблизительно 500 мкм [20]. Для облегчения промышленного применения и обеспечения долговременной стабильности свойств мембраны должны обладать механической прочностью [21], что легче обеспечить при использовании гетерогенных мембран по сравнению с гомогенными. Также мембраны должны обладать высокой селективностью по отношению к переносу противоиона. Это обуславливает интерес к поиску и характеристике новых мембран в процессе обратного электродиализа.

В этой работе изучена возможность генерации возобновляемой энергии с использованием установки, не использующей внутренние коллекторы, и новых катионообменных мембран, выпускаемых ООО «Краснодарский компрессорный за-

вод». Для этого при изменяемом сопротивлении во внешней цепи зарегистрированы зависимости скачка потенциала от силы тока во внешней цепи и генерируемой мощности во внешней цепи. Показано, что установка способна производить электрическую энергию, но на данный момент максимальные генерируемые мощность и скачок потенциала остаются небольшими по сравнению с аналогами и становится целесообразным оптимизация установки и более детальное изучение свойств мембран.

Экспериментальная часть

Установка для обратного электродиализа. Для генерации энергии методом обратного электродиализа была создана лабораторная установка, содержащая электродные камеры, парные камеры, через которые протекали растворы с различной концентрацией солей, и вспомогательную камеру. Парные камеры представляли собой индивидуальные концентрационные элементы, последовательное соединение которых создавало скачок потенциала между концевыми электродами. Каждая повторяющаяся парная камера состояла из камеры с разбавленным раствором, который во всех случаях содержал $0.100 \text{ г/дм}^3 \text{ NaCl}$, и камеры с концентрированным раствором, который в одном случае содержал $10.000 \text{ г/дм}^3 \text{ NaCl}$, а во втором – раствор, в котором 10% ионов Cl^- были заменены на эквивалентное количество SO_4^{2-} , так что итоговый раствор содержал $9.000 \text{ г/дм}^3 \text{ NaCl}$ и $1.215 \text{ г/дм}^3 \text{ Na}_2\text{SO}_4$. Система, в которой концентрированный раствор содержал индивидуальный раствор NaCl , далее обозначена как вариант 1, а система, в которой в концентрированном растворе присутствовали двухзарядные ионы, далее обозначена как вариант 2.

Концентрация растворов в этой работе была подобрана для имитации солености Азовского моря и рек его бассейна, что соответствует условиям, доступным в прибрежных городах Краснодарского

края, испытывающих перебои с электро-снабжением в летний период. Перспективными областями применения обратного электродиализа является генерация электрической энергии при утилизации жидких высокоминерализованных отходов водоподготовительных установок [22] и опосредствованном смешении концентрата обессоливания и морской воды [23], что гораздо менее подвержено проблеме высокого сопротивления разбавленного раствора, однако в условиях Российской Федерации такие условия встречаются гораздо реже, чем традиционно рассматриваемые эстуарии крупных рек. Также широко рассматриваются другие системы, например, карбонизированные растворы этаноламинов [24].

Через электродные камеры циркулировал раствор, содержащий окислительно-восстановительную пару $K_3[Fe(CN)_6]$ и $K_4[Fe(CN)_6]$, обеспечивающую протекание электродной реакции, с концентрацией каждой комплексной соли 0.05 М и 1 М NaCl в качестве фонового электролита. Концевые электроды были выполнены из титановой сетки, покрытой смешанными оксидами металлов платиновой группы. Геометрические размеры сетки составили $5 \times 5 \text{ см}^2$.

Поскольку для поддержания устойчивого функционирования анионообменной мембраны необходимо предотвратить ее контакт с $K_3[Fe(CN)_6]$ и $K_4[Fe(CN)_6]$, в схему добавлена вспомогательная катионообменная мембрана так, чтобы мембранный пакет был с обеих сторон отделен от электродных камер катионообменными мембранами.

В парные камеры и во вспомогательную камеру растворы попадали под действием силы гравитации из емкостей, расположенных приблизительно на 50 см над уровнем установки, и после прохождения камер растворы сбрасывались. Отказ от использования принудительной прокачки раствора через парные камеры позволит обойти описанную проблему нерентабельности процесса по причине

превышения потребления электроэнергии насосами генерации электроэнергии [25], однако это осуществимо только для малых потребителей. Скорость протока раствора составила 60 мл/мин через каждую камеру. Для минимизации рисков перетоков между камерами не использовалась схема с внутренними коллекторами, а каждая камера была оборудована рамкой с индивидуальной системой подвода и отвода раствора. Подвод раствора осуществлялся снизу камер, а отвод – сверху с противоположной стороны; сторона, с которой осуществляется подвод раствора, чередовалась для камер с разбавленным и с концентрированным раствором, в результате чего установка работала в перекрестноточном режиме. Используемые рамки были распечатаны 3D принтером Phrozen Sonic Mighty 8K из смолы Anycubic Basic единым массивом с сепараторами-турбулизаторами. Толщина каждой рамки составила 2 мм.

Электродные камеры были объединены в цикл, через который раствор принудительно прокачивал перистальтический насос Heidoph Hi-Pump со скоростью $220 \text{ см}^3/\text{мин}$.

Ионообменные мембраны. ООО «Краснодарский компрессорный завод» начал выпуск разработанных и произведенных Е.С. Коржовой новых катионообменных мембран, многие параметры которых не разглашаются в связи с процедурой патентования, однако известно, что они содержат сульфокатионитовый материал и армирующий материал. Мембраны не являются специально созданными для процесса обратного электродиализа, однако их небольшая толщина, составляющая $35 \pm 5 \text{ мкм}$, наличие обеспечивающего механическую прочность армирующего материала и достаточно высокая электропроводность делает их перспективными кандидатами для использования в процессе обратного электродиализа, а местное производство создает перспективы для внедрения и масштабирования

ния процесса [26]. Эти мембраны использовались в качестве внутренних катионообменных мембран в парных камерах.

В качестве анионообменных мембран в парных камерах использовались мембраны Fujifilm AEM Type-X, используемые в крупных проектах генерации энергии методом обратного электродиализа. Известно, что они содержат четвертичные аммониевые основания, их толщина составляет (115 ± 5) мкм, а электропроводность в растворе NaCl концентрацией 10 г/дм³ может быть оценена как 8 мСм/см. В качестве внешних катионообменных мембран в парных камерах использовались мембраны Fujifilm CEM Type-X. Известно, что они являются сульфокатионитовыми, их толщина составляет (115 ± 5) мкм, а электропроводность в растворе NaCl концентрацией 10 г/дм³ также может быть оценена как 8 мСм/см. Более подробно свойства мембран производства Fujifilm описаны в работах [27] и [28]. Существенным является то, что обе мембраны демонстрируют высокую селективность по отношению к переносу противоионов.

Процедура регистрации зависимости мощности от скачка потенциала. Для определения генерируемого скачка потенциала между концевыми электродами в ситуации, когда сопротивление нагрузки между ними бесконечно велико, в электронике известного также под термином «напряжение холостого хода», и регистрации зависимости генерируемой мощности от скачка потенциала запускали установку для обратного электродиализа, после чего к выходам концевых электродов подсоединяли цифровой мультиметр XDM1041 в режиме вольтметра и регистрировали максимальный генерируемый скачок потенциала, соответствующий напряжению холостого хода. Затем параллельно вольтметру присоединяли цепь, состоящую из цифрового амперметра Agilent U1251A в режиме амперметра и варьруемой нагрузки, представленной резисторами, и регистрировали скачки потенциалов и

силы тока при различных значениях внешней нагрузки, составлявшей от 1 Ом до 7500 Ом. Каждый эксперимент проводили в трех повторениях.

Обсуждение результатов

Напряжение холостого хода. Скачок потенциала, генерируемый установкой при бесконечно большом сопротивлении внешней нагрузки из градиента солесодержания в варианте 1, составил (601 ± 7) мВ. Это значение можно сравнить с суммарным диффузионным скачком потенциала, который можно рассчитать по уравнению Нернста (1):

$$E_N = \frac{\alpha RT}{zF} \ln \frac{\gamma_{HC} C_{HC}}{\gamma_{LC} C_{LC}} \quad (1)$$

где α – средняя селективность мембраны, R – универсальная газовая постоянная, T – абсолютная температура, F – постоянная Фарадея, γ – коэффициент активности, C – молярная концентрация. Нижний индекс HC означает камеру с большей концентрацией соли, LC – камеру с меньшей концентрацией соли.

Если пренебречь неидеальной селективностью мембран и отклонением коэффициента активности от 1, то максимальный расчетный скачок потенциала для одной мембраны составляет 118 мВ, а суммарный скачок потенциала для всего мембранного пакета с учетом электродных камер составляет 1419 мВ. Видно, что измеряемый скачок потенциала существенно ниже этой величины. Разница не может быть полностью отнесена к неидеальной селективности новых ионообменных мембран, поскольку в работе [26] не было обнаружено аномалий свойств этих мембран и, кроме того, в системе помимо новых мембран присутствовали высоко-селективные мембраны производства Fujifilm. Частично эти потери могут быть объяснены внутренними перетоками раствора. Соответственно, для выяснения причин снижения скачка потенциала целесообразно как исследовать селектив-

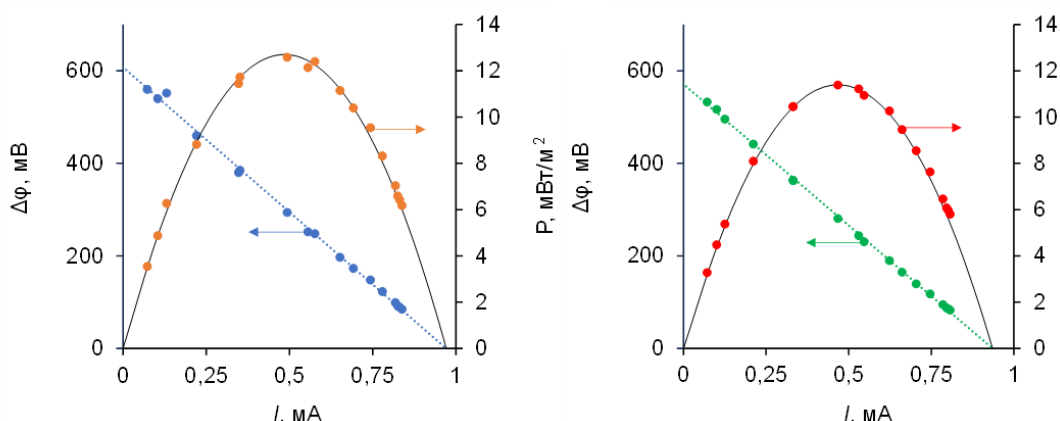


Рис. 2. Зависимость генерируемой удельной мощности и регистрируемого скачка потенциала между концевыми электродами от силы тока во внешней цепи в Варианте 1 (а) и Варианте 2 (б).

Fig. 2. Dependence of the generated specific power and the registered potential drop between the electrodes at end of stack on the current in the external circuit in Variant 1 (a) and Variant 2 (b).

ность использованных мембран, в частности, измерить концентрационные зависимости электропроводности и диффузионной проницаемости, а также определить числа переноса противоионов, так и провести контроль над отсутствием внутренних перетоков.

В Варианте 2 генерируемый скачок потенциала составил (571 ± 1) мВ, что соответствует описанной в опубликованных источниках потере генерируемой мощности в присутствии полизарядных ионов.

Удельная мощность. На рис. 2 приведены примеры кривых зависимости удельной мощности, генерируемой установкой в варианте 1 (а) и варианте 2 (б), от силы тока во внешней цепи.

Даже максимальные значения генерируемой удельной мощности составляют десятки милливольт, что существенно ниже, чем лучшие значения, сообщаемые в опубликованных источниках, достигающие тысяч милливольт [29,30]. Это легко объяснить более высоким внутренним сопротивлением ячейки, которое включает в себя различные слагаемые [31], не все из которых являются омическими, но тем не менее общее внутреннее сопротивление может быть рассчитано из закона Ома (2):

$$R_{int} = \frac{\Delta\phi}{I} - R_{ext} \quad (2)$$

где R_{ext} – сопротивление резистора, $\Delta\phi$ – скачок потенциала, регистрируемый вольтметром между концевыми электродами, I – сила тока во внешней цепи.

Суммарное внутреннее сопротивление ячейки R_{int} равно (96 ± 8) Ом в варианте 1 и (97 ± 7) Ом в варианте 2, в то время как сообщаемые сопротивления промышленных систем составляют единицы Ом [29]. Такая разница может быть объяснена несколькими отличиями. Первое из них – отличие в конструкции ячейки, при котором наличие внешних коллекторов и необходимость создания индивидуальных устройств для подвода и отвода раствора в каждой рамке требует рамок большей толщины, а именно 2 мм в использованной системе против нескольких десятков мкм в опубликованных источниках. Второе из них – отличие в концентрации использованных растворов. Использование более разбавленных растворов повышает диффузионный потенциал в соответствии с Уравнением 1, но разбавленные растворы обладают большим электросопротивлением. Поиску баланса между генерируемым скачком потенциала и внутренним сопротивлением ячейки посвящена работа [32]. Целесообразным становится создание установки, обладающей внутренними коллекторами

раствора, и сравнение мощности, генерируемой различными установками для одинаковых пар растворов.

Заключение

Для конкурентоспособности генерации электрической энергии методом обратного электролиза критически необходимо существование дешёвых ионообменных мембран, обладающих низкой толщиной и низким электросопротивлением. В этой работе была исследована производительность установки без внутренних коллекторов раствора, в состав которой входили катионообменные мембраны тестовой партии, выпускаемые местным производителем ООО «Краснодарский компрессорный завод», и катионообменные и анионообменные мембраны производства Fujifilm, используемые в крупных европейских проектах.

Показано, что скачок потенциала между концевыми электродами ячейки при бесконечно большом сопротивлении между ними, соответствующий понятию «напряжение холостого хода» в электронике, существенно ниже ожидаемого исходя из концентрации использованных растворов, что может быть объяснено как внутренними перетоками раствора вслед-

ствие дефектов тестируемой конструкции, так и неидеальной селективностью использованных мембран.

Максимальная генерируемая удельная мощность также не достигла лучших параметров, сообщенных в опубликованных источниках, что вызвано высоким внутренним электросопротивлением установки, связанным с большой толщиной камер и с высоким электросопротивлением более разбавленного раствора.

Проведенные исследования подвели возможные слабые места подхода и позволили определить направления дальнейшего совершенствования генерирующей установки и более подробной характеристики новых ионообменных мембран. Также целесообразным представляется проведение сравнения генерации энергии с использованием новых катионообменных мембран и с использованием серийно выпускаемых мембран, предназначенных для обратного электролиза.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет известных финансовых конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в этой статье.

Список литературы/References

1. Leading countries by renewable energy consumption worldwide in 2023. Available at: <https://www.statista.com/statistics/237090/renewable-energy-consumption-of-the-top-15-countries/> (accessed 25.03.2025).
2. Alvarez-Silva O.A., Osorio A.F., Winter C., Practical global salinity gradient energy potential, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016; 60: 1387-1395. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.03.021>
3. Touati K., Tadeo F., Chae S.H., Kim J.H., Alvarez-Silva O. Pressure retarded osmosis: Renewable energy generation and recovery. Cambridge, Academic Press, 2017, 188 p.
4. Rahman S.N., Saleem H., Zaidi S.J., Progress in membranes for pressure retarded osmosis application, *Desalination*, 2023; 549:

116347. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2022.116347>

5. Chae S., Kim H., Hong J. G., Jang J., Higa M., Pishnamazi M., Choi J.-H., Walgama R.C., Bae C., Kim I.S., Park J.-S., Clean power generation from salinity gradient using reverse electrodialysis technologies: Recent advances, bottlenecks, and future direction, *Chem. Eng. J.*, 2023; 452 pt. 4: 139482. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.139482>

6. Pawlowski S., Geraldес V., Crespo J.G., Velizarov S., Computational fluid dynamics (CFD) assisted analysis of profiled membranes performance in reverse electrodialysis, *J. Membr. Sci.*, 2016; 502: 179-190. <http://dx.doi.org/10.1016/j.memsci.2015.11.031>

7. Veerman J., Post J.W., Saakes M., Metz S.J., Harmsen G.J., Reducing power losses



- caused by ionic shortcut currents in reverse electrodialysis stacks by a validated model, *J. Membr. Sci.*, 2008; 310(1-2): 418-430. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2007.11.032>
8. Yamane R., Ichikawa M., Mizutani Y., Onoue Y., Concentrated brine production from sea water by electrodialysis using exchange membranes, *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.*, 1969; 8(2): 159-165. <https://doi.org/10.1021/i260030a003>
9. Shaposhnik V.A., Kesore K., An early history of electrodialysis with permselective membranes, *J. Membr. Sci.*, 1997; 136(1-2): 35-39. [https://doi.org/10.1016/S0376-7388\(97\)00149-X](https://doi.org/10.1016/S0376-7388(97)00149-X)
10. Shaposhnik V.A., Eliseeva T.V., Milestones in the history of science (for the 170th anniversary of ion exchange discovery and the 130th anniversary of electrodialysis), *Sorbtsionnye i Khromatograficheskie Protssesy*, 2020; 20(2): 305-314. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2020.20/2786> (In Russ.)
11. Zabolotskii V.I., Berezina N.P., Nikonenko V.V., Shaposhnik V.A., Tskhai A.A., Razvitie elektrodializa v Rossii, *Membrany*, 1999; (6): 4-27. (In Russ.)
12. Vasil'eva V.I., Shaposhnik V.A., Grigor-chuk O.V., Local mass transfer during electrodialysis with ion-exchange membranes and spacers, *Russian Journal of Electrochemistry*, 2001; 37(11): 1164-1171.
13. Wang L., Zhao Y., Zhichun L., Liu W., Long R., Deep learning-assisted prediction and profiled membrane microstructure inverse design for reverse electrodialysis, *Energy*, 2024; 312: 133484. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.133484>
14. Kotov V.V., Isaev N.I., Shaposhnik V.A., Perenos slabykh elektrolitov cherez ionoobmennye membrany, *Zh. Fiz. Khim.*, 1972; 46: 539-540. (In Russ.)
15. Pismenskaya N., Nikonenko V., Auclair B., Pourcelly G., Transport of weak-electrolyte anions through anion exchange membranes: Current-voltage characteristics, *J. Membr. Sci.*, 2001; 189(1): 129-140. [https://doi.org/10.1016/S0376-7388\(01\)00405-7](https://doi.org/10.1016/S0376-7388(01)00405-7)
16. Gaber R.I., Le T.P.P., Alhseinat E., Nogueira R.P., Shetty D., Hasan S.W., Banat F., Energy recovery from produced water via reverse electrodialysis: The role of heavy metals and soluble organics on process performance, *Energy Conversion and Management*, 2023; 293: 117433. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117433>
17. Slavinskaya G.V., Shaposhnik V.A., Pilkina O.I., Strizhak N.P., Kuznetsova N.S., Izmenenie elektrohimicheskikh svoystv anionoobmennoj membrany MA-40 v vodnykh rastvorakh ful'vokislot, *Journal of Water Chemistry and Technology*, 1989; 11(9): 813-316. (In Russ.)
18. Kingsbury R.S., Liu F., Zhu S., Boggs C., Armstrong M.D., Call D.F., Coronell O., Impact of natural organic matter and inorganic solutes on energy recovery from five real salinity gradients using reverse electrodialysis, *J. Membr. Sci.*, 2017; 541: 621-632. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2017.07.038>
19. Jin D., Jin Y., Sustainable power generation from salinity gradients by reverse electrodialysis: Influence of divalent ions, *Chemical Engineering Research and Design*, 2023; 198: 69-80. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2023.08.044>
20. Loza S.A., Korzhov A.N., Romanyuk N.A., Smyshliaev N.A., Modificirovannye ionoobmennye membrany dlya obratnogo elektrodializa, Physical chemistry and electrochemistry of molten and solid electrolytes", Proceedings of the XVIII Russian Conference, September 21-25, 2020, Nalchik, 2020, 211-212. (In Russ.)
21. Avci A.H., Rijnaarts T., Fontananova E., Di Profio G., Vankelecom I.F.V., De Vos W.M., Curcio E., Sulfonated polyethersulfone based cation exchange membranes for reverse electrodialysis under high salinity gradients, *J. Membr. Sci.*, 2020; 595: 117585. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2019.117585>
22. Filimonova A.A., Chichirov A.A., Chichirova N.D., The utilization of highly mineralized liquid waste from a chemical desalination water treatment plant of a TPP with the generation of electrical energy by reverse electrodialysis, *Membranes and Membrane Technologies*, 2021; 3(5): 344-350. <https://doi.org/10.1134/S2218117221050059>
23. Semenyuk A.V., Knyajev V.V., Garmash S.A., Ship water-desalinating installation with electric power development, *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka*, 2010; (2): 340-343. (In Russ.)
24. Novitsky E.G., Grushevenko E.A., Vasil'evsky V.P., Volkov A.V., Studying the possibilities of generating electric-power by reverse electrodialysis of monoethanolamine aqueous

solutions, *Membranes and Membrane Technologies*, 2020; 2(2): 109-114. <https://doi.org/10.1134/S2218117221050059>

25. Bykov V.I., Il'ina S.I., Ravichev L.V., Production of electrical energy from industrial wastewater using reverse electrodialysis, *Industrial Processes and Technologies*, 2023; 3(2(9)): 79-85. [https://doi.org/10.37816/2713-0789-2023-3-2\(9\)-79-85](https://doi.org/10.37816/2713-0789-2023-3-2(9)-79-85)

26. Ponomar M., Korzhova E., Lopatin D., Sarapulova V., Dammak L., Voroshilov I., Characterization of pore-filling cation-exchange membrane in sodium chloride solution, "Ion transport in organic and inorganic membranes", Proceedings of the International conference, May 27 – June 01, 2024, Sochi, 2024: 239-241.

27. Sarapulova V., Shkorkina I., Mareev S., Pismenskaya N., Kononenko N., Larchet C., Dammak L., Nikonenko V., Transport characteristics of Fujifilm ion-exchange membranes as compared to homogeneous membranes AMX and CMX and to heterogeneous membranes MK-40 and MA-41, *Membranes (Basel)*, 2019; 9(7): 84. <https://doi.org/10.3390/membranes9070084>

28. Rijnaarts T., Huerta E., van Baak W., Nijmeijer K., Effect of divalent cations on RED

performance and cation exchange membrane selection to enhance power densities, *Environ. Sci. Technol.*, 2009; 51(21): 13028-13035. <https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/acs.est.7b03858>

29. Veerman J., de Jong R.M., Saakes M., Metz S.J., Harmsen G.J., Reverse electrodialysis: Comparison of six commercial membrane pairs on the thermodynamic efficiency and power density, *J. Membr. Sci.*, 2009; 343(1-2): 7-15. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2009.05.047>

30. Vermaas D.A., Guler E., Saakes M., Nijmeijer K., Theoretical power density from salinity gradients using reverse electrodialysis, *Energy Procedia*, 2012; 20: 170-184. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.03.018>

31. Lacey R.E., Energy by reverse electrodialysis, *Ocean Engineering*, 1969; 3(1): 1-47. [https://doi.org/10.1016/0029-8018\(80\)90030-X](https://doi.org/10.1016/0029-8018(80)90030-X)

32. Loza S.A., Korzhov A.N., Loza N.V., Romanyuk N.A., Energy generation by reverse electrodialysis, "Energy Systems", Proceedings of the IV International Scientific and Technical Conference, October 31 – November 01, 2019, Belgorod, 2020, article 012057.

Информация об авторах / Information about the authors

А.В. Клевцова – младший научный сотрудник, научно-исследовательской части, PhD in Agriculture, Кубанский Государственный Университет, Краснодар, Россия

Е.С. Коржова – руководитель проекта, PhD, ООО «Краснодарский компрессорный завод», Краснодар, Россия

А.С. Кириченко – доцент кафедры электротехники, теплотехники и возобновляемых источников энергии, к.т.н., Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина, Краснодар, Россия

К.А. Кириченко – старший научный сотрудник научно-исследовательской части, к.х.н., Кубанский Государственный Университет, Краснодар, Россия

A.V. Klevtsova – junior researcher» of research and development department, PhD in Agriculture, Kuban State University, Krasnodar, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0003-1157-7991>

E.S. Korzhova – project leader, PhD, Krasnodar Compressor Plant Ltd., Krasnodar, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-3863-4418>

A.S. Kirichenko – senior lecturer of department of electric engineering, thermotechnics and renewable energy sources, PhD in technical sciences, Kuban State Agrarian University Named After I.T. Trubilin, Krasnodar, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-1256-7632>

K.A. Kirichenko – senior researcher of research and development department, PhD in chemical sciences, Kuban State University, Krasnodar, Russian Federation, e-mail: ksenia8kirichenko@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9152-1105>

Статья поступила в редакцию 19.05.2025; одобрена после рецензирования 30.06.2025; принята к публикации 06.07.2025.

The article was submitted 19.05.2025; approved after reviewing 30.06.2025; accepted for publication 06.07.2025.