

Получение электрической энергии из промышленных сточных вод при помощи обратного электродиализа

В. И. Быков*, С. И. Ильина*, Л. В. Равичев*,¹

* Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева,
Москва, Россия

Аннотация

В работе рассматривается применение мембранных процессов как один из альтернативных методов получения электрической энергии. В качестве данных процессов рассмотрен обратный электродиализ. Выделены преимущества и недостатки процесса, а также проблемы его практического применения для получения энергии из морской и речной воды. Показано, что данный процесс нерентабелен, так как при больших производительностях потребление электроэнергии насосами превышает производительность электродиализатора. Были сделаны выводы о возможности применения процесса обратного электродиализа для рекуперации энергии из промышленных сточных вод. Показаны зависимости получаемой мощности от солесодержания низкоконцентрированного и высококонцентрированного растворов, а также от отношения их солесодержаний. На основании данных зависимостей сделаны выводы об оптимальном отношении солесодержаний.

Ключевые слова

Электродиализ, обратный электродиализ, мембранная технология.

Введение

Доступность энергоресурсов становится краеугольным камнем в человеческих отношениях, что подчас определяет межгосударственные взаимодействия. Энергетический кризис сказывается не только на работе промышленных предприятий, но и обыденной жизни населения.

К основным (или традиционным) источникам электроэнергии относят теплоэлектростанции, гидроэлектростанции, атомные электростанции. Главные проблемы их использования — расход

невозобновляемых ресурсов и загрязнение окружающей среды.

В настоящее время все шире стали применять в качестве источников электроэнергии возобновляемые ресурсы — энергию ветра, солнца, приливов.

Преимуществом альтернативного получения энергии, помимо использования возобновляемых ресурсов, является отсутствие загрязнений среды при производстве энергии, а главными недостатками — высокая стоимость получаемой энергии

¹ Для переписки

Email: ravichevlv@list.ru

(в разы превышающая стоимость энергии, получаемой традиционными способами) и наличие суточных флуктуаций при получении электроэнергии. Также стоит отметить загрязнение среды при производстве и утилизации компонентов электростанций — свалки лопастей ветрогенераторов, загрязнение среды при производстве солнечных панелей.

На данный момент ведутся исследования альтернативных методов получения энергии с применением полупроницаемых мембран — осмотические электростанции и обратный электродиализ. Оба метода в качестве движущей силы используют разность концентраций (например, морской и речной воды) [1].

В работе по изучению и практическому применению обратного электродиализа было отмечено, что его невозможно использовать в промышленных масштабах, так как при больших производительностях потребление электроэнергии насосами превышает количество произведенной энергии [2-4]. Возможными путями решения данной проблемы является использование небольших потоков с более высокой концентрацией, применение более энергоэффективных насосов, а также мембран и аппаратов с меньшим гидродинамическим сопротивлением. Кроме того, проанализировав достоинства и недостатки предлагаемого метода, был сделан вывод, что он может быть использован на химических предприятиях, где промышленные сточные воды имеют высокую концентрацию и перекачиваются насосами. Такой вариант может разрешить вышеуказанные проблемы и сгенерировать часть электроэнергии, которая может быть возвращена обратно в процесс.

Обратный электродиализ

Обратный электродиализ — это процесс, позволяющий преобразовать

разность концентраций потоков в разность потенциалов.

Схема процесса представлена на рисунке 1. Под действием диффузии в модуле создается направленный ток ионов за счет диффузии из камеры, где протекает поток электролита с более высокой концентрацией в камеру с потоком электролита с более низкой концентрацией. Катионы, согласно градиенту концентрации, диффундируют через полупроницаемую катионообменную мембрану из соленого потока в обессоленный. Таким же образом переходят анионы, но через полупроницаемую анионообменную мембрану. Ионный ток преобразуется в электрический на окислительно-восстановительных электродах [5-10].

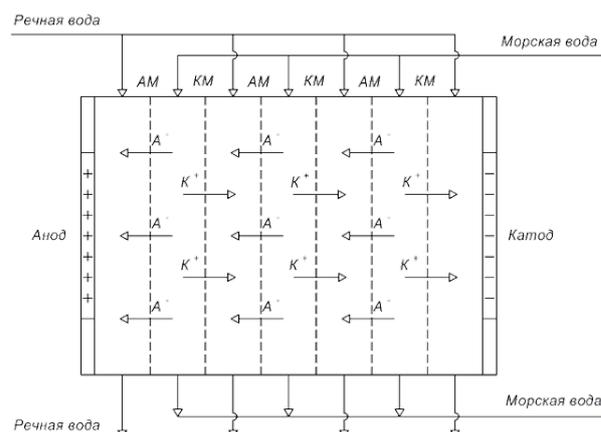


Рисунок 1 — Схема процесса обратного электродиализа

К преимуществам получения энергии при помощи градиента солености относятся: возобновляемость ресурсов (при использовании речной и морской воды), отсутствие различных загрязнений, отсутствие суточных флуктуаций.

Энергию градиента солености можно охарактеризовать как энергию смешения двух растворов с разной концентрацией соли. Мощность обратного электродиализа можно рассчитать по формуле 1, включающей в себя параметры аппарата (число и площадь мембран), параметры мембраны (селективность, сопротивление) и

параметры потоков (активности и удельное сопротивление растворов).

$$W_{max} = \frac{N * A \left[\left(\alpha \frac{RT}{nF} \ln \left(\frac{ac}{ad} \right) \right)^2 \right]}{(RAEM + RCEM + dc/kc + dd/kd)} \quad (1)$$

где α — селективность мембран, N — число мембранных пар (штук), A — площадь мембраны (m^2); ac и ad — активности концентрированного и разбавленного растворов соответственно; $RAEM$ и $RCEM$ — сопротивление анионообменной и катионообменной мембран ($Om \cdot m$); dc , dd — толщина отсеков концентрирования и обессоливания (m); kc и kd — удельное сопротивление концентрированного и разбавленного растворов соответственно.

Стоит отметить, что основное влияние на протекание процесса оказывает не разница концентраций, а отношение активностей концентрированного и разбавленного растворов.

Нами были проведены расчёты с целью уточнения оптимальных условий использования обратного электродиализа. Для расчета были выбраны мембраны производства компании “Fumasep”: FAD (анионообменные), FKD (катионообменные).

Параметры электродиализного аппарата:

- Количество ячеек (пар мембран): 200 ячеек.
- Площадь мембраны: $0.24 m^2$.
- Сопротивление мембраны: $5.9 \times 10^{-4} Om \cdot m^2$.
- Селективность мембраны: 0.88.
- Толщина камеры обессоливания: 2 мм.
- Толщина камеры концентрирования: 1 мм.

Как следует из формулы (1), для эффективного проведения процесса необходимы мембраны, обладающие низким сопротивлением. Также значительный вклад в выработку электроэнергии имеет

удельное сопротивление растворов, которое зависит от концентрации раствора.

В рассматриваемом нами интервале наблюдается следующая зависимость удельного сопротивления от содержания, представленная на рисунке 2. Проанализировав полученные данные, можно сделать вывод, что при низком содержании (до ~ 5 г/л по NaCl) определяющим фактором является удельное сопротивление, так как с уменьшением содержания наблюдается резкий рост удельного сопротивления. Далее, при концентрациях выше ~ 5 г/л, удельное сопротивление почти не изменяется с ростом содержания. Таким образом, при низком содержании лимитирующей стадией будет удельное сопротивление раствора, а при высоком — отношение активностей растворов.

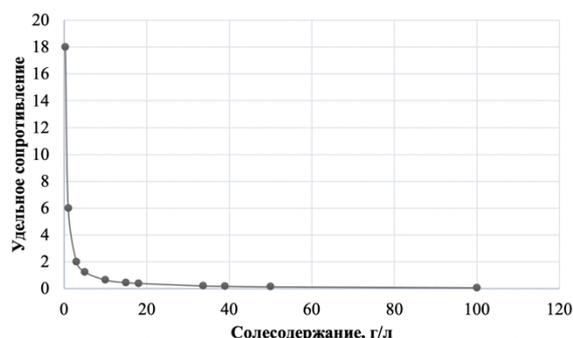


Рисунок 2 — Зависимость удельного сопротивления раствора от содержания

Нами были проведены расчеты мощности, получаемой с помощью обратного электродиализа, в зависимости от различных параметров. По соответствующим расчетам были получены графики, представленные ниже.

На основании представленной на рисунке 3 зависимости можно сделать вывод о росте мощности с увеличением содержания высококонцентрированного раствора.

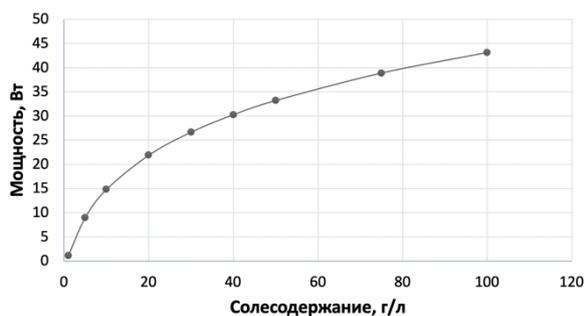


Рисунок 3 — Зависимость получаемой мощности от солевого содержания высококонцентрированного раствора при солевого содержания низкоконцентрированного раствора 0.3 г/л

Зависимость мощности от солевого содержания низкоконцентрированного раствора при постоянном солевого содержания показана на рисунке 4. Из графика видно, что с увеличением солевого содержания мощность сначала увеличивается из-за уменьшения удельного сопротивления низкоконцентрированного раствора, а далее снижается из-за уменьшения отношения активностей растворов.

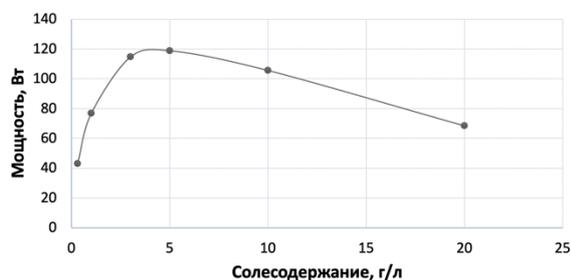


Рисунок 4 — Зависимость получаемой мощности от солевого содержания низкоконцентрированного раствора при солевого содержания высококонцентрированного раствора 100 г/л

Зависимость мощности от отношения солевого содержания при различных солевого содержаниях высококонцентрированного раствора показана на рисунке 5, где можно наблюдать, что независимо от солевого содержания высококонцентрированного раствора график будет иметь максимум при отношении солевого содержания в пределах 15–25 г/л.

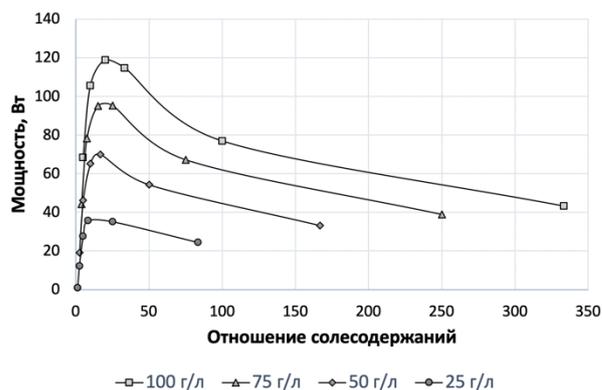


Рисунок 5 — Зависимость получаемой мощности от отношения солевого содержания

Заключение

Обратный электродиализ целесообразно применять для рекуперации энергии на промышленных предприятиях, используя потоки сточных вод.

При протекании процесса обратного электродиализа можно выделить следующие лимитирующие факторы: отношение активностей растворов и сопротивление модуля, причем при низком солевого содержания лимитирующей стадией будет удельное сопротивление раствора, а при высоком — отношение активностей растворов.

Обратный электродиализ является перспективным альтернативным направлением получения электроэнергии, однако, необходимо выбрать условия его оптимального использования. В данном случае оптимальным является отношение солевого содержания растворов в пределах 15–25 г/л.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. El Bassam N. Distributed Renewable Energies for Off-Grid Communities, Elsevier, 2021.
- [2]. Быков В. И., Ильина С. И., Равичев Л. В., Вегель Д. А., Титов А. А. Оценка эффективности получения электроэнергии методом обратного электродиализа. Сборник материалов XXVII международной научно-практической конференции

«Академическая наука — проблемы и достижения», 2021.

[3]. Veerman J., Saakes M., Metz S. J., Harmsen G. J. Reverse electrodialysis: Performance of a stack with 50 cells on the mixing of sea and river water. *Journal of Membrane Science*, 2009, no. 327, pp. 136–144.

[4]. Pattle R. E. Production of Electric Power by mixing Fresh and Salt Water in the Hydroelectric Pile. *Nature*, 1954, no. 174, p. 660.

[5]. Suda F., Matsuo T., Ushioda D. Transient changes in the power output from the concentration difference cell (dialytic battery) between seawater and river water. *Energy*, 2007, no. 32, p. 165–173.

[6]. Lacey R. E. Energy by reverse electrodialysis. *Ocean Engineering*, 1980, no. 7, p. 1–47.

[7]. Jagur-Grodzinski J., Kramer R. Novel process for direct conversion of free energy of mixing into electric power. *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*, 1986, no. 25, p. 443–449.

[8]. Brauns E. Towards a worldwide sustainable and simultaneous large-scale production of renewable energy and potable water through salinity gradient power by combining reversed electrodialysis and solar power. *Desalination*, 2008, no. 219, p. 312–323.

[9]. Brauns E. Salinity gradient power by reverse electrodialysis: effect of model parameters on electrical power output. *Desalination*, 2009, no. 237, p. 378–391.

[10]. Audinos R. Electric power produced from two solutions of unequal salinity by reverse electrodialysis. *Indian Journal of Chemistry*, 1992, no. 31A, p. 348–354.

Быков Владислав Игоревич — аспирант, ассистент кафедры процессов и аппаратов химической технологии, Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева (Российская Федерация, 125047, Москва, Миусская площадь, д. 9)

Ильина Светлана Игоревна — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры процессов и аппаратов химической технологии, Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева (Российская Федерация, 125047, Москва, Миусская площадь, д. 9)

Равичев Леонид Владимирович — д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой процессов и аппаратов химической технологии, Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева (Российская Федерация, 125047, Москва, Миусская площадь, д. 9)

Production of electrical energy from industrial wastewater using reverse electro dialysis

V. I. Bykov*, S. I. Il'ina*, L. V. Ravichev*,¹

* *Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russia*

Abstract

The paper considers the use of membrane processes as one of the alternative methods of obtaining electrical energy. Reverse electro dialysis is considered as these processes. The advantages and disadvantages of the process are highlighted, as well as the problems of its practical application for obtaining energy from sea and river water. It is shown that this process is unprofitable, since at high capacities the electricity consumption of pumps exceeds the performance of the electro dialyzer. Conclusions were drawn about the possibility of using the reverse electro dialysis process for energy recovery from industrial wastewater. The dependences of the received power on the salinity of low-concentrated and high-concentrated solutions, as well as on the ratio of their salinity, are shown. Based on these dependencies, conclusions are drawn about the optimal ratio of salinity.

Keywords

Electro dialysis, reverse electro dialysis, osmotic power plant, membrane technology.

REFERENCES

- [1]. El Bassam N. Distributed Renewable Energies for Off-Grid Communities, Elsevier, 2021.
- [2]. Bykov V. I., Ilyina S. I., Ravichev L. V., Vogel D. A., Titov A. A. Ocenka jeffektivnosti poluchenija jelektroenergii metodom obratnogo jelektrodializa [Assessment of the effectiveness of electricity generation by reverse electro dialysis method]. *Sbornik materialov HXVII mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii "Akademicheskaja nauka — problemy i dostizhenija" [Collection of Materials of the XVII International Scientific and Practical Conference "Academic Science — Problems and Achievements"]*, 2021. (In Russ.)
- [3]. Veerman J., Saakes M., Metz S. J., Harmsen G. J. Reverse electro dialysis: Performance of a stack with 50 cells on the mixing of sea and river water. *Journal of Membrane Science*, 2009, no. 327, pp. 136–144.
- [4]. Pattle R. E. Production of Electric Power by mixing Fresh and Salt Water in the Hydroelectric Pile. *Nature*, 1954, no. 174, p. 660.
- [5]. Suda F., Matsuo T., Ushioda D. Transient changes in the power output from the concentration difference cell (dialytic battery) between seawater and river water. *Energy*, 2007, no. 32, p. 165–173.

¹ *Corresponding author*
Email: ravichevlv@list.ru

- [6]. Lacey R. E. Energy by reverse electro dialysis. *Ocean Engineering*, 1980, no. 7, p. 1–47.
- [7]. Jagur-Grodzinski J., Kramer R. Novel process for direct conversion of free energy of mixing into electric power. *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*, 1986, no. 25, p. 443–449.
- [8]. Brauns E. Towards a worldwide sustainable and simultaneous large-scale production of renewable energy and potable water through salinity gradient power by combining reversed electro dialysis and solar power. *Desalination*, 2008, no. 219, p. 312–323.
- [9]. Brauns E. Salinity gradient power by reverse electro dialysis: effect of model parameters on electrical power output. *Desalination*, 2009, no. 237, p. 378–391.
- [10]. Audinos R. Electric power produced from two solutions of unequal salinity by reverse electro dialysis. *Indian Journal of Chemistry*, 1992, no. 31A, p. 348–354.

Bykov V. I. — Postgraduate student, Assistant, Department of Processes and Devices of Chemical Technology of D.I. Mendeleev Russian State Technical University (Miuskaya square, 9, Moscow, 125047, Russian Federation).

Il'ina S. I. — Dr. Sc. (Eng.), Head of the Department of Processes and Devices of Chemical Technology of D.I. Mendeleev Russian State Technical University (Miuskaya square, 9, Moscow, 125047, Russian Federation).

Ravichev L. V. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Processes and Devices of Chemical Technology of D.I. Mendeleev Russian State Technical University (Miuskaya square, 9, Moscow, 125047, Russian Federation).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Получение электрической энергии из промышленных сточных вод при помощи обратного электролиза / В. И. Быков, С. И. Ильина, Л. В. Равичев // Промышленные процессы и технологии. 2023. Т. 3. № 2(9). С. 79 – 85.

DOI: 10.37816/2713-0789-2023-3-2(9)-79-85

Please cite this article as:

Bykov V. I., Il'ina S. I., Ravichev L. V. Production of electrical energy from industrial wastewater using reverse electro dialysis. *Industrial processes and Technologies*, 2023, vol. 3, no. 2(9), pp. 79 – 85.

DOI: 10.37816/2713-0789-2023-3-2(9)-79-85