



РЕСПУБЛИКА КАЗАХСТАН

(19) KZ (13) U (11) 12564
(51) H01M 50/40 (2021.01)

МИНИСТЕРСТВО ЮСТИЦИИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

ОПИСАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ

(21) 2026/0031.2

(22) 08.01.2026

(45) 10.07.2026, бюл. №27

(72) Мулай Рашид Бабаа (UZ); Мамадиев Музаффарбек Хайрулла угли (KZ); Холмаматова Наргис Султонмурод кизи (KZ); Маникс П. Баланэй (KZ); Ибраева Аягоз Кайруллакызы (KZ); Сулейменова Диана Адилхановна (KZ)

(73) Частное учреждение «National Laboratory Astana» (KZ)

(74) Суюндуков Мади Жмайевич

(56) US 8932448 B2, 13.01.2015

(54) **МНОГОСТУПЕНЧАТАЯ СИСТЕМА ОБРАТНОГО ЭЛЕКТРОДИАЛИЗА ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ И СНИЖЕНИЯ СОЛЁНОСТИ ВОДЫ**

(57) Полезная модель относится к области экологических и энергетических технологий, а именно к устройствам для получения электроэнергии за счёт градиента солёности водных растворов с одновременным снижением их минерализации.

Задачей полезной модели является создание устройства, обеспечивающего повышение эффективности генерации электроэнергии за счёт

последовательного использования градиента солёности и снижение минерализации воды.

Поставленная задача решается тем, что многоступенчатая система обратного электродиализа для генерации электроэнергии и снижения солёности воды содержит мембранные стеки, включающие чередующиеся анионообменные и катионообменные мембраны, образующие ячейки, электродные блоки и гидравлическую систему подачи и отвода растворов.

Заявляемая полезная модель обеспечивает:

- повышение эффективности использования градиента солёности;
- возможность поэтапного снижения солёности раствора;
- возможность использования выходного раствора в аквакультурных системах;
- автономность работы за счёт собственной генерации энергии.

Полезная модель разработана в рамках грантового инансирования (ИРН AP23489476) Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан.

(19) KZ (13) U (11) 12564

Полезная модель относится к области экологических и энергетических технологий, а именно к устройствам для получения электроэнергии за счёт градиента солёности водных растворов с одновременным снижением их минерализации.

Известны устройства обратного электродиализа (ОЭД), предназначенные для генерации электроэнергии за счёт разности концентраций солевых растворов.

Известно решение по патенту CN109617455B (Xiang J., Zhang W., Li H., 2020), в котором раскрыта система генерации электроэнергии методом обратного электродиализа с использованием мембранных стеков и различных схем соединения модулей. Устройство предусматривает регулирование потоков растворов для повышения эффективности.

Недостатками данного решения являются отсутствие конкретизации рабочих диапазонов солёности, ограниченная эффективность одноэтапной схемы, а также невозможность дальнейшего использования растворов с высокой минерализацией.

Известно решение по патенту KR101297930B1 (Kim J., Park S., Lee H., 2013), в котором предложено устройство обратного электродиализа с циркуляцией концентрированных и разбавленных растворов через мембранные стеки.

Недостатками данного решения являются отсутствие характеристик используемых мембран и электродов, ограниченность одноэтапным процессом и отсутствие использования разбавленной воды после выхода из системы.

Наиболее близким к заявляемому решению является устройство по патенту US 8,932,448 B2 (Redstack B.V.), содержащее мембранные стеки с ионообменными мембранами, образующими ячейки, и электродные блоки.

Недостатками прототипа являются ограниченность диапазона используемой солёности, отсутствие многоступенчатого использования градиента концентраций и отсутствие конструктивной реализации повторного использования разбавленного раствора.

Задачей полезной модели является создание устройства, обеспечивающего повышение эффективности генерации электроэнергии за счёт последовательного использования градиента солёности и снижение минерализации воды.

Поставленная задача решается тем, что многоступенчатая система обратного электродиализа для генерации электроэнергии и снижения солёности воды содержит мембранные стеки, включающие чередующиеся анионообменные и катионообменные мембраны, образующие ячейки, электродные блоки и гидравлическую систему подачи и отвода растворов.

Система выполнена в виде трёх последовательно расположенных каскадов мембранных стеков, содержащих соответственно 273, 545 и 1090 ячеек.

При этом выход каждого каскада гидравлически соединён с входом последующего каскада.

Выход последнего каскада гидравлически соединён с аквакультурными бассейнами.

Система выполнена в виде трёх последовательно расположенных каскадов мембранных стеков, содержащих соответственно 273, 545 и 1090 ячеек.

При этом выход каждого каскада гидравлически соединён с входом последующего каскада, а выход последнего каскада соединён с аквакультурными бассейнами.

В качестве мембран используются анионообменные и катионообменные мембраны, обеспечивающие перенос ионов между растворами.

Электродные блоки выполнены с возможностью съёма электрической энергии, генерируемой в процессе переноса ионов.

Гидравлическая система обеспечивает подачу растворов различной концентрации в мембранные стеки и их последовательное прохождение через каскады.

Аквакультурные бассейны выполнены с возможностью приёма раствора, прошедшего через последний каскад, и его дальнейшего использования.

Технический результат заключается в повышении эффективности генерации электроэнергии и снижении солёности воды.

Указанный результат достигается за счёт выполнения системы в виде последовательно соединённых каскадов мембранных стеков, обеспечивающих поэтапное использование градиента солёности, а также за счёт гидравлического соединения каскадов, обеспечивающего последовательное снижение минерализации раствора.

Электроэнергия, получаемая системой, используется для полного покрытия собственных нужд установки: работы насосов, систем фильтрации, аэрации и обслуживания аквакультуры. Таким образом, комплекс является энергоавтономным и не требует внешнего источника электроснабжения.

Предлагаемая устойчиво-интегрированная система для получения электроэнергии из солевых градиентов и водного восстановления иллюстрируется следующим примером конкретного исполнения. В опытной установке три каскада стеков были собраны в единую гидравлическую схему с последовательным прохождением растворов. Каждый каскад включал мембранные ячейки с рабочей площадью 44×44 см², размещённые в чередующемся порядке (АЕМ–КЕМ). В первом каскаде обеспечивалось максимальное падение градиента за счёт высокой разницы концентраций, во втором и третьем каскадах использовалась промежуточная вода из предыдущей ступени, что позволяло снизить общие потери и увеличить энергоподачу. Суммарная площадь мембран составила 150 м², что обеспечило удельную мощность на уровне 2.97 Вт/м².

Для оценки параметров работы многоступенчатой системы обратного электродиализа были проведены расчёты открытого напряжения, сопротивления, мощности и энергетической эффективности.

Открытое напряжение рассчитывалось по формуле 1:

$$E = \alpha \cdot N \cdot \frac{RT}{zF} \cdot \ln \left(\frac{a_{\text{сол}}}{a_{\text{разб}}} \right) \quad (1)$$

где α — коэффициент селективности мембран, N — число ячеек в каскаде, R — универсальная газовая постоянная, T — температура, z — заряд иона, F — постоянная Фарадея, $a_{\text{сол}}$ и $a_{\text{разб}}$ — активности ионов в солёной и разбавленной воде соответственно.

Сопротивление ячейки определялось как сумма сопротивлений мембран и растворов (формула 2):

$$R_{\text{яч}} = R_{\text{АЕМ}} + R_{\text{КЕМ}} + R_{\text{сол}} + R_{\text{разб}} \quad (2)$$

где $R_{\text{яч}}$ сопротивления ячейки, $R_{\text{АЕМ}}$ и $R_{\text{КЕМ}}$ — сопротивления анионо- и катионообменной мембраны соответственно, $R_{\text{сол}}$ и $R_{\text{разб}}$ — сопротивления растворов. Суммарное внутреннее сопротивление каскада (формула 3):

$$R_{\text{вн}} = N \cdot R_{\text{яч}} + R_{\text{эл}} \quad (3)$$

где $R_{\text{эл}}$ — сопротивление электродных систем.

Максимальная удельная мощность определялась по формуле 4:

$$P_{\text{max}} = \frac{E^2}{4R_{\text{вн}}} \quad (4)$$

где P_{max} — максимальная удельная мощность ($\text{Вт}/\text{м}^2$).

КПД преобразования определялось как отношение максимальной извлекаемой мощности к поступающему потоку свободной энергии (формула 5):

$$\eta = \frac{P_{\text{max}}}{SGE_{\text{in}}}, \quad (5)$$

где SGE_{in} — поток энергии, связанной с осмотическим градиентом.

Система работает следующим образом.

Растворы с различной концентрацией подаются в первый каскад мембранных стеков. В процессе переноса ионов через ионообменные мембраны возникает разность потенциалов, которая используется для генерации электрической энергии.

После прохождения первого каскада раствор поступает во второй каскад, затем в третий, при этом происходит последовательное снижение его солёности.

Раствор, прошедший через последний каскад, поступает в аквакультурные бассейны.

Электрическая энергия, генерируемая системой, используется для обеспечения работы её элементов.

Пример расчёта для одного каскада с 545 ячейками показал, что при исходной солёности Аральского моря ($2387 \text{ моль}/\text{м}^3$) и сточных вод ($5.71 \text{ моль}/\text{м}^3$) открытое напряжение составило порядка

48 В, внутреннее сопротивление $\sim 16 \text{ }\Omega$, что обеспечило удельную мощность около $3 \text{ Вт}/\text{м}^2$ мембранной поверхности. В трёхступенчатой схеме значение мощности стабилизировалось на уровне $2.97 \text{ Вт}/\text{м}^2$, что подтверждает эффективность каскадного подхода.

Для оценки экономической целесообразности работы многоступенчатой системы обратного электродиализа были рассчитаны капитальные и эксплуатационные затраты, а также уровень себестоимости электроэнергии.

Капитальные затраты включают стоимость мембран, электродов, корпусов стеков, насосного оборудования и систем фильтрации. Совокупные капитальные затраты опытной установки составили $\text{€}153,000$.

Эксплуатационные затраты включают расходы на обслуживание мембран, очистку системы и замену электродного раствора. Годовой уровень эксплуатационных расходов составил $\text{€}6,120$.

Уровень себестоимости электроэнергии рассчитывался по формуле 6:

$$LCOE = \frac{CAPEX + OPEX_{\text{annual}} \cdot T}{E_{\text{gen}} \cdot T}, \quad (6)$$

где $LCOE$ — уровень себестоимости электроэнергии, $CAPEX$ — капитальные затраты, $OPEX$ — эксплуатационные расходы, T — срок эксплуатации (лет), E_{gen} — годовая генерация электроэнергии.

При производительности системы $5.20 \times 10^4 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{год}$ значение уровень себестоимости электроэнергии составил $0.338 \text{ €/кВт} \cdot \text{ч}$, что сопоставимо с пилотными проектами в Европе, но достигнуто в условиях экстремально высокой минерализации.

Дополнительно оценено влияние каскадного снижения солёности на стоимость: одноэтапная устойчиво-интегрированная система для получения электроэнергии из солевых градиентов и водного восстановления показала уровень себестоимости электроэнергии $> 0.45 \text{ €/кВт} \cdot \text{ч}$, тогда как трёхступенчатая снизила показатель на 25%, обеспечив энергоэффективность за счёт повторного использования промежуточных растворов.

Пример осуществления

В одном из вариантов выполнения система содержит три каскада мембранных стеков с количеством ячеек 273, 545 и 1090 соответственно. Мембранные ячейки выполнены с использованием чередующихся анионообменных и катионообменных мембран.

Каскады соединены последовательно по гидравлической схеме.

Суммарная площадь мембран составляет около 150 м^2 .

Таким образом, расчёты подтверждают, что предлагаемая устойчиво-интегрированная система для получения электроэнергии из солевых градиентов и водного восстановления сочетает достаточный энергетический выход ($2.97 \text{ Вт}/\text{м}^2$) и приемлемый экономический уровень (0.338

€/кВт·ч), что делает её перспективной для внедрения в условиях Аральского региона.

Заявляемая полезная модель обеспечивает:

- повышение эффективности использования градиента солёности;
- возможность поэтапного снижения солёности раствора;
- возможность использования выходного раствора в аквакультурных системах;
- автономность работы за счёт собственной генерации энергии.

Полезная модель разработана в рамках грантового инансирования (ИРН АР23489476) Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан.

ФОРМУЛА ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ

Многоступенчатая система обратного электродиализа для генерации электроэнергии и снижения солёности воды, содержащая мембранные стеки, включающие чередующиеся анионообменные и катионообменные мембраны, образующие ячейки, электродные блоки, а также гидравлическую систему подачи и отвода растворов, *отличающаяся* тем, что система выполнена в виде трёх последовательно расположенных каскадов мембранных стеков, содержащих соответственно 273, 545 и 1090 ячеек, при этом выход каждого каскада гидравлически соединён с входом последующего каскада, а выход последнего каскада гидравлически соединён с аквакультурными бассейнами.