

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОДИАЛИЗНОГО МЕТОДА С ОХЛАЖДЕНИЕМ РАСТВОРОВ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЕ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ

С. И. Лазарев, О. В. Долгова, К. В. Шестаков

ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», Тамбов, Россия

Ключевые слова: гальванические стоки; охлаждение; очистка сточных вод; период окупаемости; электродиализатор с охлаждением раствора.

Аннотация: Предложено изменение конструкции электродиализатора путем включения в устройство системы охлаждения трубок, проходящих сквозь блок ионообменных мембран, по которым через внутренний объем аппарата подается охлаждающая вода. Представлено устройство и принцип работы электродиализатора, проведено сравнение с прототипом. Рассмотрена возможность применения электродиализатора с охлаждением раствора в процесс очистки гальванических сточных вод. Предложена технологическая схема очистки промышленных растворов с использованием электродиализатора с увеличенной площадью мембран и охлаждением. Проведена оценка затрат на эксплуатацию представленной схемы. Рассчитаны экономический эффект от внедрения и период окупаемости технологического процесса.

Введение

К оборудованию, внедряемому в промышленную эксплуатацию, предъявляется ряд требований, направленных на обеспечение непрерывности технологического процесса: оптимальная степень разделения больших объемов технологических растворов, использование дешевых и долговечных материалов для изготовления оборудования, компактный размер, простота обслуживания и эксплуатации, низкое энергопотребление

Лазарев Сергей Иванович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Механика и инженерная графика»; Долгова Ольга Валерьевна – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Природопользование и защита окружающей среды, e-mail: o.v.dolgova@mail.ru; Шестаков Константин Валерьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Механика и инженерная графика», ТамбГТУ, Тамбов, Россия.

и др.[1, 2]. Внедрение электродиализаторов в технологические схемы разделения промышленных сточных вод вскрыло ряд проблем, которые в лабораторных условиях не проявлялись [3 – 7]. При непрерывной эксплуатации аппарата происходит нагрев жидкости в электродиализаторе. Причинами этого являются выделение энергии при нагреве электродов и трение раствора об элементы конструкции [8, 9]. Нагрев аппарата приводит к возникновению ряда негативных эффектов, из которых выделяется изменение структуры мембранных элементов, катионо- и анионообменных мембран, в состав которых входят полимерные материалы, чувствительные к нагреванию, как следствие, уменьшается степень разделения и сокращается срок службы ионообменных мембран [10, 11].

Можно выделить два пути решения обсуждаемой проблемы: разработка новых термостабильных мембран [12 – 15] и охлаждение аппарата [16 – 18], которые имеют свои достоинства и недостатки. Термостабильные мембраны способны сохранять свои свойства при более высоких температурах, но стоимость их производства значительно выше. Также может быть уменьшена и скорость разделения растворов.

Охлаждение можно организовать несколькими способами:

- охлаждение раствора, подаваемого на очистку: перед входом в аппарат очищаемый раствор проходит через систему охлаждения, где его температура понижается на несколько градусов;
- охлаждение наружной поверхности аппарата: оборудование изготавливают с рубашкой, куда подается охладитель, и в непрерывном режиме осуществляется охлаждение внешних стенок реакционной камеры;
- охлаждение внутреннего объема аппарата: хладагент доставляется в аппарат по размещенным в нем змеевикам, трубам и т.д.

В работе рассматривается конструкция и принцип работы электродиализатора с охлаждением. В предлагаемый аппарат встроены трубки, которые пронизывают аппарат по всему внутреннему сечению, в них подается охладитель (вода), что позволяет поддерживать постоянную температуру во внутреннем объеме электродиализатора.

Состав и принцип работы электродиализатора

На рисунках 1, 2 представлен электродиализатор с охлаждением. Аппарат состоит из двух прижимных плит 1 и 12 соответственно на входе в аппарат и выходе из него, изготовленных из фторопласта, на внутренних поверхностях которых в пазах размещены катод 14 и анод 13 соответственно на входе в установку и выходе из нее. Между прижимными плитами размещаются 23 пакета мембран, каждый пакет состоит из катионообменной 17 и анионообменной 19 мембран, разделенных прокладками-спейсерами 18, 20, блок мембран ограничивается упорными прокладками-спейсерами 16. В электродиализаторе предусмотрено омывание катода и анода через штуцеры 6, 7. По всей длине электродиализатора расположено 14 сквозных отверстий, внутри которых размещены трубки охлаждающей системы 9. Все элементы электродиализатора фиксируются металлическими пластинами 10, соединенными между собой с помощью скрепляющих элементов 11.

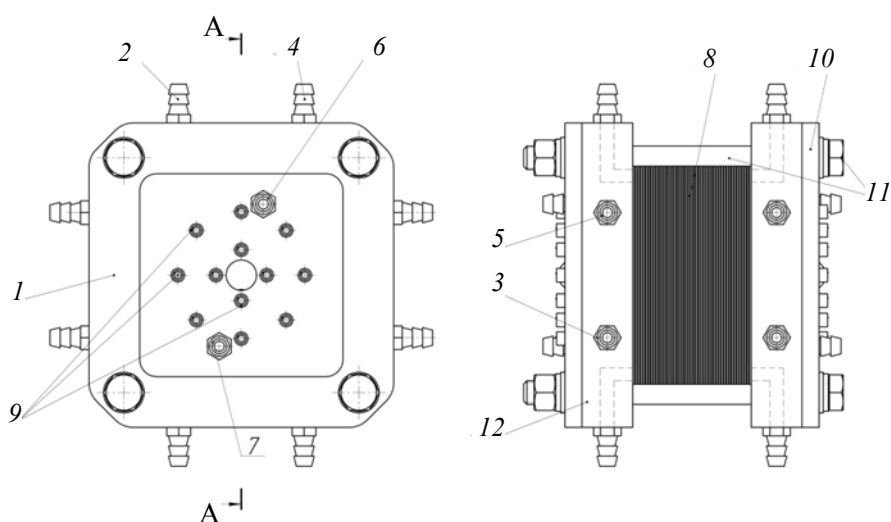


Рис. 1. Ячейка электродиализного разделения с охлаждением:

1, 12 – прижимные плиты; 2, 4 – штуцеры подачи соответственно концентрата и диллюата; 3, 5 – штуцеры вывода соответственно концентрата и диллюата; 6, 7 – штуцеры соответственно подачи и вывода омывающего раствора для катода (анода); 8 – пакеты чередующихся ионообменных мембран; 9 – трубки системы охлаждения; 10 – металлическая пластина; 11 – скрепляющие элементы

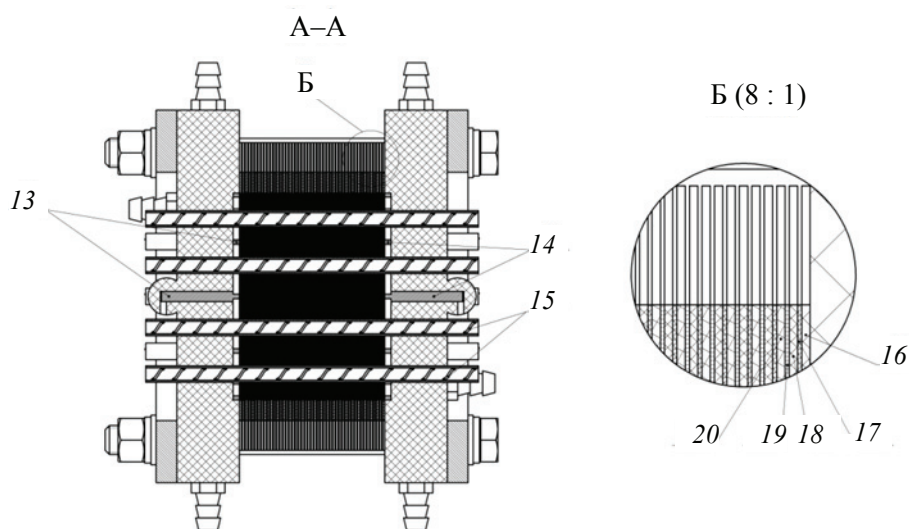


Рис. 2. Порядок компоновки в ячейке разделения:

13 – анод; 14 – катод; 15 – спиральные направляющие трубок охлаждения; 16 – упорная прокладка-спейсер; 17, 19 – соответственно катионо- и анионообменные мембраны; 18, 20 – прокладки-спейсеры для катионо- и анионообменных мембран соответственно

Электродиализатор работает следующим образом. Разделяемый раствор (концентрат) распределяют на четыре потока и по штуцерам 2 подают в электродиализатор, туда же через четыре штуцера 4 подается разделяемый раствор (диллюат). Штуцеры 2 и 4 размещены поочередно на торцевых поверхностях прижимной плиты 1. Далее растворы (концентрат и диллюат) попадают во внутренний объем электродиализатора и проходят

последовательно через чередующиеся анионообменные и катионообменные мембраны, разделенные прокладками-спейсерами. Внешний вид составных частей пакета мембран представлен на рис. 3. Поток разделяемого раствора (концентрата) последовательно проходит через четыре отверстия 21 в упорной прокладке-спейсере 16, катионообменной мембране 17, прокладке-спейсере 18, анионообменной мембране 19 и в отверстии-впадине 22 в прокладке-спейсере 20 и далее по всем 23 пакетам ионообменных мембран подается к прижимной плите 12 и выводится из аппарата через выходные штуцеры 3. Далее раствор повторно подается на вход электродиализатора, цикл пребывания раствора в аппарате длится 600 с, обработка в течение этого времени обеспечивает степень очистки от ионов тяжелых металлов в более чем 95 %.

Пакет мембран собирается в следующем порядке: катионообменная мембрана 17, прокладка-спейсер 18, анионообменная мембрана 19, прокладка-спейсер 20, далее последовательность повторяется, пакеты мембран от прижимных плит 1, 12 отделяются упорной прокладкой-спейсером 16.

Прокладки-спейсеры изготовлены из силиконовой резины, в них имеются отверстия для прохода разделяемых растворов, в упорных прокладках-спейсерах 16 восемь отверстий расположены попарно и симметрично в вершинах условных квадратов, центральная часть представляет собой мелкозернистую сетку, в которой имеются двенадцать отверстий для размещения трубок системы охлаждения. Внешний вид прокладок-

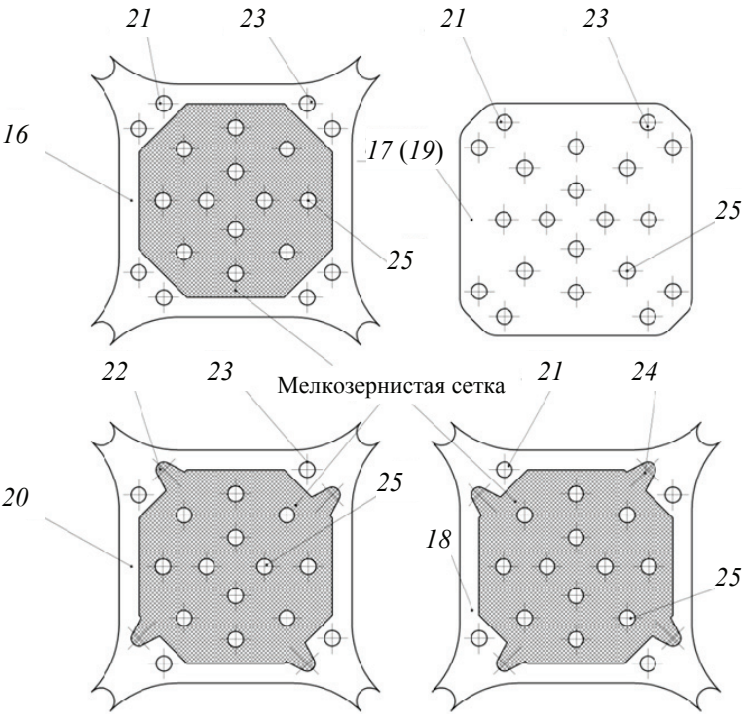


Рис. 3. Составные части пакета мембран:

21, 23 – отверстия для прохода разделяемого раствора соответственно концентрата и диллюата; 22, 24 – впадины для прохода соответственно концентрата и диллюата в межмембранное пространство

спейсеров 18 и 20 немного изменен, отверстия 21 и 23 в них поочередно заменены на сетчатые отверстия-впадины 22 и 24. Это приводит к тому, что часть разделяемого раствора попадает в межмембранное пространство, образованное соответствующей прокладкой-спейсером (концентрат через отверстия-впадины 22, дилуат через отверстия-впадины 24). Под действием электрического поля, наложенного с помощью внешнего источника электрического тока через два электрода 14 (катод) и 13 (анод), в межмембранное пространство в ходе электролитической диссоциации компонентов разделяемого раствора из соседних межмембранных пространств поступают катионы и анионы через катионообменные 17 и анионообменные 19 мембраны, образуя тем самым концентрированный поток веществ, из которых состоит разделяемый раствор.

Движение потоков разделяемых растворов (дилуата и концентрата) аналогичны, но концентрат движется по каналам 2. Часть дилуата, пройдя через отверстия 23, попадает в межмембранное пространство, образованное катионообменной мембраной 17 и прокладкой-спейсером 18, через отверстия-впадины 24, где в ходе электролитической диссоциации компонентов разделяемого раствора удаляются катионы и анионы через катионообменные 17 и анионообменные 19 мембраны в соседние межмембранные пространства, образуя тем самым обессоленный и обедненный солями поток жидкости.

Омывание электродов (катода 13 и анода 14) осуществляется через штуцер 6 прижимных плит 1, 12 и позволяет вывести из аппарата через штуцер 7 раствор с повышенным содержанием катионов (каталит) и анионов (аналит) от соответствующих электродов.

Трубки для подачи охлаждающей воды в количестве 12 штук размещены в соосно расположенных отверстиях в прижимных плитах, прокладках-спейсерах и мембранах и проходят сквозь аппарат. Герметичность системы обеспечивается соединением с натягом. Для обеспечения максимального теплоперехода трубки распределены в объеме аппарата равномерно и снабжены спиральными направляющими 15.

Попытки внедрить в промышленное применение электродиализатор с охлаждением разделяемых растворов предпринимаются постоянно. К аппаратам, использующим охлаждение, относится электродиализатор, представленный в [18]. Сравнительные характеристики предлагаемой конструкции и прототипа приведены в табл. 1, откуда видно, что в рассматриваемом электродиализаторе на 40 % уменьшена толщина прижимных плит за счет соосного расположения штуцеров подачи концентрата и дилуата. Это позволило при одинаковых габаритных размерах аппаратов увеличить полезное внутреннее пространство для размещения большего числа пакетов мембран с 10 до 23 штук, соответственно в 2,3 раза увеличилась активная площадь ионообменных мембран. Для улучшения теплопередачи уменьшена толщина трубок охлаждения, в них установлены металлические спиральные направляющие для сохранения жесткости и турбулизации охлаждающей воды в трубках.

Таблица 1

Сравнительные характеристики электродиализаторов

Параметр	Представленная конструкция	Прототип
Габариты, см	22,6×22,6×18,9	22,6×22,6×19
Ширина одной прижимной плиты, см	30	50
Общая ширина пакета мембран и прокладок, см	70	31
Число мембран, шт.: катионообменных анионообменных	23	10
Общая активная площадь мембран, см ² : катионообменных анионообменных	2012,5	875
Число камер, шт.: обессоливания концентрирования	23 22	10 9
Общий объем камер, см ³ : обессоливания концентрирования	201,25 192,5	87,5 78,75
Масса, кг	до 5	до 7

Технологическая схема разделения растворов

Электродиализатор с увеличенной площадью и охлаждением предполагается использовать, в том числе для разделения сточных вод гальванических производств. Технологическая схема разделения промышленных растворов с охлаждаемым электродиализатором представлена на рис. 4.

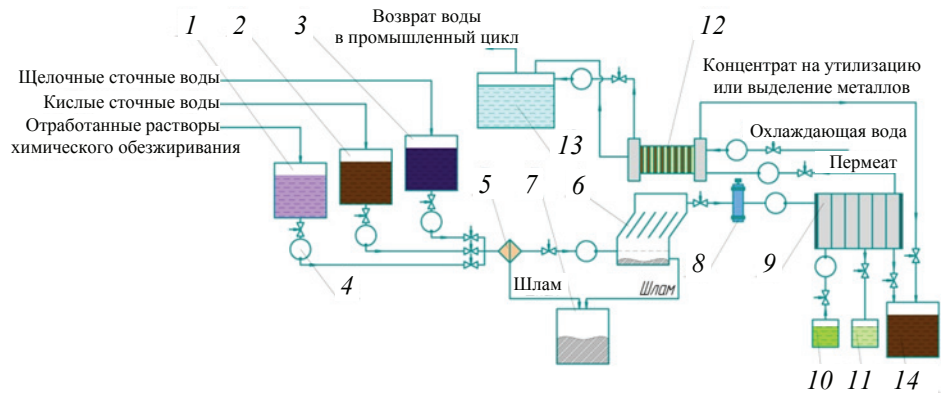


Рис. 4. Технологическая схема очистки сточных вод гальванических производств с охлаждаемым электродиализатором:
1 – емкость с отработанным раствором химического обезжиривания; 2, 3 – емкости соответственно кислых и щелочных сточных вод; 4 – насос; 5 – фильтр грубой очистки; 6 – фильтр-отстойник; 7 – шламосборник; 8 – установка коррективы pH; 9 – электрогиперфильтрационный аппарат; 10 – емкость с чистящими реагентами; 11, 13, 14 – емкости сбора соответственно отработанных чистящих реагентов, очищенной воды и концентрата; 12 – электродиализатор

В соответствующих емкостях накапливаются стоки, в емкости 1 – отработанные растворы химического обезжиривания, 2, 3 – соответственно кислые и щелочные сточные воды. Перед подачей на электродиализатор из сточной воды необходимо извлечь взвешенные частицы, которые могут вывести из строя электродиализатор, забив его внутреннее пространство. Для этого в схему включены фильтр грубой очистки 5 и фильтр-отстойник 6. Далее стоки направляются на первую ступень очистки в электрогиперфильтрационный аппарат 9, пермеат из которого подается на электродиализатор 12, оборудованный системой охлаждения, где осуществляется финишная очистка. В емкости 13 накапливается очищенная и отработанная охлаждающая вода. Для сбора концентрата используется емкость 14.

Установка работает следующим образом. Насосом 4 один из разделяемых растворов подается на фильтр грубой очистки 5, где из него извлекают частицы размером более 100 мкм. Далее раствор с помощью насоса 4 поступает в фильтр-отстойник 6. Уловленные взвешенные вещества собираются в шламособорнике 7. Сточные воды с уменьшенным содержанием взвешенных частиц направляются на установку корректировки pH 8, регулировка pH необходима для обеспечения максимальной степени извлечения в электрогиперфильтрационном аппарате 9. Образующийся в процессе очистки в 9 концентрат (насыщенный раствор извлекаемых веществ) удаляется в емкость 14, откуда направляется на дальнейшую обработку (выделение солей металлов или утилизация). Очищенная вода (пермеат) продолжает движение по системе. В состав установки 9 входит емкость 10 с реагентами для периодической очистки мембран. Затем чистящие реагенты собираются в емкости 11 для последующего обращения. В электродиализаторе 12 с улучшенной производительностью и охлаждением пермеат подвергаются углубленной очистке. Для предотвращения нагревания раствора в процессе разделения аппарат имеет систему охлаждения, вода из водопроводной сети направляется внутрь по системе трубок, насквозь пронизывающих внутреннее пространство. Отработанная охлаждающая вода и очищенная в электродиализаторе направляются в сборную емкость 13, откуда жидкость возвращается обратно в промышленный цикл, так как по составу соответствует технологическим требованиям. Загрязненная вода в виде ретентата выводится из аппарата и направляется в емкость сбора концентрата после очистки сточных вод 14.

Внедрение в гальваническое производство представленной технологической схемы потребует у предприятия инвестиций ориентировочно в размере 5 млн рублей. В эту стоимость включены следующие работы: разработка проектной и исполнительной документации, закупка аппаратов, комплектующих, сборка технологической схемы и вывод на рабочий режим. Срок службы установки 10 лет. Внедрение оборудования считается целесообразным, если период окупаемости меньше 3/4 от срока службы установки.

Экономический расчет

Оценим затраты предприятия на эксплуатацию технологической схемы.

1. Потребность в электроэнергии. В схеме электроэнергию потребляют: семь непрерывно работающих насосов (по 4 кВт·ч) (насосы от емко-

стей 1 – 3 работают попеременно), электродиализатор (10 кВт·ч), электрогиперфильтрационный аппарат (15 кВт·ч) и вспомогательная электроника на другом оборудовании (1 кВт·ч), режим работы восемь часов в день, 22 рабочих дня в месяц:

$$\Pi_3 = (7 \cdot 4 + 1 \cdot 10 + 1 \cdot 15 + 1) \times 8 \cdot 22 = 9504 \text{ кВт·ч.}$$

Стоимость электроэнергии 4,91 р./(кВт·ч) в Тамбовской области на 2024 г.

$$З_{эл.м} = 9504 \cdot 4,91 \approx 46\,665 \text{ р.}$$

2. Ежемесячные затраты на зарплату персонала с учетом всех положенных премий и отчислений, включая вредность производства (зарплата в месяц: лаборант – 25 500 р., технолог – 40 000 р., слесарь – 30 000 р.),

$$З_{з.п.м} = 1,315 \cdot (25\,500 + 40\,000 + 30\,000) \cdot 1,15 \approx 144\,420 \text{ р.}$$

3. Ежемесячные затраты на амортизацию оборудования (срок службы оборудования – 10 лет)

$$З_{ам} = \frac{5\,000\,000}{120} \approx 41\,667 \text{ р.}$$

4. Ежемесячные затраты на техническое обслуживание и закупку реагентов (предварительная стоимость годового обслуживания оборудования 600 тыс. р.)

$$З_{тех.р} = \frac{600\,000}{12} = 50\,000 \text{ р.}$$

5. Месячная стоимость утилизации шлама, образовавшегося в ходе очистки стоков, с учетом средней рыночной стоимости утилизации гальванических отходов в 8 000 р. за тонну (удельный норматив образования шлама – 10 % от объема сточных вод или 0,1 т/м³, сухой остаток – 0,04 %, массовый коэффициент влажности осадка – 1,834)

$$З_{шл.ут} = 10000 \cdot 0,1 \cdot 0,0004 \cdot 1,834 \cdot 8000 = 0,7336 \cdot 8000 = 5870 \text{ р.}$$

6. Суммарные ежемесячные затраты

$$\begin{aligned} З_{м} &= З_{эл.м} + З_{з.п.м} + З_{ам} + З_{тех.р} + З_{шл.ут} = \\ &= 46\,665 + 144\,420 + 41\,667 + 50\,000 + 5\,870 = 288\,622 \text{ р.} \end{aligned}$$

7. Суммарные затраты на очистку на 1 м³ раствора

$$З_{м1} = \frac{З_{м}}{10000} = \frac{288\,622}{10000} \approx 28,9 \text{ р.}$$

Возможный экономический эффект внедрения технологической схемы с периодом использования 10 лет.

1. Экономия месячного восполнения воды в количестве, эквивалентном сброшенному в канализацию (стоимость холодной воды в Тамбовской области – 29,2 р./м³):

$$\Theta_{\text{в.м}} = 10000 \cdot 0,8 \cdot 29,2 = 233\,600 \text{ р.}$$

2. Месячная экономия на повторном использовании выделенных из сточных вод металлов при рыночной цене CuSO_4 в 200 р./кг (исходная концентрация катионов Cu^{2+} в стоках – 0,16 кг/м³, экспериментально найденная средняя степень очистки исходного раствора от катионов Cu^{2+} – 0,987, безвозвратные потери катионов – 15 % от исходного количества),

$$\Theta_{\text{в.м.м}} = 10000 \cdot 0,16 \cdot 0,987 \cdot (1 - 0,15) \cdot 200 = 268\,464 \text{ р.}$$

Следует отметить, что расчет экономии по данной графе условный, проведенный по одному компоненту (катиону Cu^{2+}). Так как в составе сточных вод присутствует большее количество ценных для выделения компонентов, то данную графу экономии можно увеличить.

3. Месячные затраты на восполнение безвозвратно потерянного в процессе очистки количества воды и на охлаждающую воду

$$З_{\text{в.м}} = 10000 \cdot 0,2 \cdot 29,2 = 58\,400 \text{ р.}$$

4. Ежемесячные затраты на восстановление металлов из концентратов

$$З_{\text{в.м.м}} = 25\,000 \text{ р.}$$

5. Суммарная годовая экономия

$$\begin{aligned} \Theta_{\text{сум.г}} &= (\Theta_{\text{в.м}} + \Theta_{\text{в.м.м}} - З_{\text{м}} - З_{\text{в.м}} - З_{\text{в.м.м}}) \cdot 12 = \\ &= (233\,600 + 268\,464 - 288\,662 - 58\,400 - 25\,000) \cdot 12 = 1\,560\,024 \text{ р.} \end{aligned}$$

На следующем этапе необходимо провести расчеты для определения денежного потока, индекса доходности, чистого дисконтированного дохода и периода окупаемости $T_{\text{ок}}$ на основе минимальных полученных значений [19, 20].

Денежный поток равен ежегодной прибыли

$$\text{ДП} = 1\,560\,024 \text{ р.}$$

Индекс доходности необходимо рассчитать по формуле

$$\text{ИД} = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^n \text{ДП} \frac{1}{(1+E)^j} = \frac{1}{5\,000\,000} \sum_{j=1}^{10} \frac{1\,560\,024}{(1+0,15)^j} = 1,6, \quad (1)$$

где K – инвестированные в проект денежные средства; E – норма дисконта (среднее значение равно 15 %).

Полученный индекс доходности больше 1, поэтому проект внедрения технологической схемы можно считать рентабельным.

Чистый дисконтированный доход рассчитывали по формуле

$$\text{ЧД} = \sum_{j=1}^n \text{ДП} \frac{1}{(1+E)^j} = \sum_{j=1}^{10} \frac{1\,560\,024}{(1+0,15)^j} = 7\,829\,400 \text{ р.} \quad (2)$$

Период окупаемости рассчитывается следующим образом:

$$T_{\text{ок}} = \frac{TK}{\sum_{j=1}^n \frac{ДП}{(1+E)^j}} = \frac{10 \cdot 5\,000\,000}{\sum_{j=1}^{10} \frac{1\,560\,024}{(1+0,15)^j}} = 6,4 \text{ года.} \quad (3)$$

Период окупаемости – 6,4 года (с учетом срока службы оборудования, входящего в состав установки – 10 лет) считается приемлемым.

Заключение

Рассмотрен состав и принцип действия электродиализатора с увеличенной поверхностью и охлаждением. Охлаждение осуществляется водой, поступающей в аппарат по силиконовым трубкам, размещенным внутри блока мембран. Для улучшения теплопередачи уменьшена толщина трубок, в них помещены металлические спиральные направляющие, придающие трубкам жесткость и турбулизирующие охлаждающую воду. Оптимизировано расположение штуцеров подачи разделяемых растворов, что позволило уменьшить толщину прижимных плит и при сохранении размеров аппарата увеличить количество мембран и площадь поверхности разделения.

Внедрение в технологическую схему рассматриваемого электродиализатора позволит увеличить срок службы оборудования и скорость очистки сточных вод. Отработанная охлаждающая вода может быть использована в технологическом процессе гальванизации вместе с очищенной водой.

Рассчитанный период окупаемости технологической схемы (6,4 года), показывает, что внедрение технологической схемы, включающей электродиализатор с охлаждением, экономически приемлемо.

Список литературы

1. Ермоленко, Б. В. Оптимизация процесса выбора технологий и оборудования для очистки сточных вод гальванического производства / Б. В. Ермоленко, Е. Н. Кузин // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. – 2024. – Т. 67, № 2. – С. 111 – 118. doi: 10.6060/ivkkt.20246702.6913
2. Джубари, М. К. Эффективность электродиализа при очистке промышленных сточных вод / М. К. Джубари, Н. В. Алексеева // Вестник технологического университета. – 2020. – Т. 23, № 7. – С. 33 – 39.
3. Фомичев, В. Т. Очистка хромосодержащих вод электродиализом в нестационарном режиме / В. Т. Фомичев, Г. П. Губаревич, А. В. Савченко // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2020. – № 1(78). – С. 190 – 195.
4. Öner, M. R. Bipolar Membrane Electrodialysis for Mixed Salt Water Treatment: Evaluation of Parameters on Process Performance / M. R. Öner, A. Kanca, O. N. Ata [et al.] // Journal of Environmental Chemical Engineering. – 2021. – Vol. 9, Is. 4. – P. 105750. doi: 10.1016/j.jece.2021.105750
5. Нифталиев, С. И. Применение биполярного электродиализа с модифицированными мембранами при очистке хромосодержащих сточных вод гальванического производства / С. И. Нифталиев, О. А. Козадрова, К. Б. Ким // Экология и промышленность России. – 2021. – Т. 25, № 10. – С. 4 – 9. doi: 10.18412/1816-0395-2021-10-4-9

6. Липин, А. Г. Очистка сточных вод от моноаммонийфосфата в электромембранном аппарате / А. Г. Липин, А. А. Липин, Н. А. Архипов // Российский химический журнал. – 2019. – Т. LXIII, № 3-4. – С. 45 – 49. doi: 10.6060/rcj.2019633.6
7. Dudeja, I. Electrodialysis: A Novel Technology in the Food Industry // In book: Emerging Techniques for Food Processing and Preservation / I. Dudeja, P. Nikhanj, A. Singh. – CRC Press, 2023. – 25 p.
8. Peng, Z. Leakage Circuit Characteristics of a Bipolar Membrane Electrodialyzer with 5 BP-A-C Units / P. Zheng, Y. Sun // Journal of Membrane Science. – 2020. – Vol. 597. – P. 117762. doi: 10.1016/j.memsci.2019.117762
9. A Mathematical Model of the External Circuits in a Bipolar Membrane Electrodialysis Stack: Leakage Currents and Joule Heating Effect / Z. Peng, Y. Sun, P. Shi, Y. Wang // Separation and Purification Technology. – 2022. – Vol. 290, No. 2. – P. 120816. doi: 10.1016/j.seppur.2022.120816
10. Микроскопический анализ поверхности гетерогенных мембран с разной степенью дисперсности ионообменника после температурного воздействия / Э. М. Акберова, А. М. Яцев, Е. Ю. Кожухова, В. И. Васильева // Конденсированные среды и межфазные границы. – 2017. – Т. 19, № 2. – С. 158 – 165.
11. Hu, Y. Grand Challenge in Membrane Applications: Liquid / Y. Hu // Frontiers in Membrane Science and Technology. – 2023. – No. 2. – P. 1177528. doi: 10.3389/fmst.2023.1177528
12. Xie, R. A Novel Thermoresponsive Catalytic Membrane with Multiscale Pores Prepared via Vapor-Induced Phase Separation / R. Xie, L. Feng, Z. Lei [et al.] // Smart Porous Membranes. – 2018. – Vol 14, No. 18. – P. 1703650. doi: 10.1002/sml.201703650
13. Luo, X. Thermoresponsive Membrane Based on UCST-Type Organoboron Polymer for Smart Gating and Self-Cleaning / X. Luo, X. Liu, Y. Wang [et al.] // Journal of Membrane Science. – 2024. – No. 693. – P 122343.
14. Carraretto, I. M. Characterization of the Physical Properties of the Thermoresponsive Block-Copolymer PAGB2000 and Numerical Assessment of its Potentialities in Forward Osmosis Desalination / I. M. Carraretto, V. Ruzzi, F. Lodigiani [et al.] // Polymer Testing. – 2023. – Vol. 128, No. 9. – P. 108238. doi:10.1016/j.polymeresting.2023.108238
15. Zhang, X. Smart TFC Membrane for Simulated Textile Wastewater Concentration at Elevated Temperature Enabled by Thermal-Responsive Microgels / X. Zhang, S. Xiong, C. Liu [et al.] // Desalination. – 2021. – No. 500. – P. 114870. doi: 10.1016/j.desal.2020.114870
16. Перспективы использования электромембранных технологий в энергетике / А. А. Филимонова, Н. Д. Чичирова, А. А. Чичиров, А. И. Минибаев // Труды академэнерго. – 2020. – № 2(59). – С. 55 – 76.
17. Пат. 2788625 С1 Российская Федерация, МПК B01D61/18. Электробаромембранный аппарат комбинированного типа / С. И. Лазарев, Д. Н. Коновалов, П. А. Галкина, П. М. Малинин ; заявитель и патентообладатель Тамб. гос. техн. ун-т. – № 2022127259 ; заявл. 20.10.2022 ; опубл. 23.01.2023. – Бюл. № 3. – 18 с.
18. Пат. 2690339 С1 Российская Федерация, МПК B01D61/42 Электродиализатор с охлаждением разделяемого раствора / С. И. Лазарев, С. В. Ковалев, К. В. Шестаков, П. А. Хохлов ; заявитель и патентообладатель Тамб. гос. техн. ун-т. – № 2018137145 ; заявл. 22.10.2018 ; опубл. 31.05.2019. – Бюл. № 16. – 15 с.
19. Пикуза, В. И. Экономические расчеты и бизнес-моделирование в Excel / В. И. Пикуза. – СПб. : Питер, 2012. – 400 с.
20. Азимов, А. М. Оценка экономической эффективности мембранного метода подготовки питьевой воды / А. М. Азимов, А. Камшыбаев, Н. Н. Исабаев // Central Asian Economic Review. – 2023. – № 2(149). – С. 117 – 128. doi: 10.52821/2789-4401-2023-2-117-128

References

1. Yermolenko B.V., Kuzin Ye.N. [Optimization of the process of selecting technologies and equipment for wastewater treatment of galvanic production], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Seriya: Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya* [News of higher educational institutions. Series: Chemistry and chemical technology], 2024, vol. 67, no. 2, pp. 111-118. doi: 10.6060/ivkkt.20246702.6913 (In Russ., abstract in Eng.)
2. Dzhubari M.K., Alekseeva N.V. [Efficiency of electrodialysis in industrial wastewater treatment], *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Technological University], 2020, vol. 23, no. 7, pp. 33-39. (In Russ., abstract in Eng.)
3. Fomichev V.T., Gubarevich G.P., Savchenko A.V. [Purification of chromium-containing waters by electrodialysis in a non-stationary mode], *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura* [Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and architecture], 2020, no. 1(78), pp. 190-195. (In Russ., abstract in Eng.)
4. Öner M.R., A. Kanca, O.N. Ata [et al.], Bipolar membrane electrodialysis for mixed salt water treatment: Evaluation of parameters on process performance, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2021, vol. 9, no. 4, pp. 105750. doi: 10.1016/j.jece.2021.105750
5. Niftaliev S.I., Kozaderova O.A., Kim K.B. [Application of bipolar electrodialysis with modified membranes in the treatment of chromium-containing wastewater from galvanic production], *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* [Ecology and industry of Russia], 2021, vol. 25, no. 10, pp. 4-9. doi: 10.18412/1816-0395-2021-10-4-9 (In Russ., abstract in Eng.)
6. Lipin A.G., Lipin A.A., Arkhipov N.A. [Wastewater treatment from monoammonium phosphate in an electric membrane], *Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal* [Russian chemical journal], 2019, vol. 63, no. 3-4, pp. 45-49. doi: 10.6060/rcj.2019633.6 (In Russ., abstract in Eng.).
7. Dudeja I., Nikhanj A.P. Singh Electrodialysis: A Novel Technology in the Food Industry. In book: *Emerging Techniques for Food Processing and Preservation*, CRC Press, 2024, 25 p.
8. Peng Z., Sun Y. Leakage circuit characteristics of a bipolar membrane electrodialyzer with 5 BP-A-C units, *Journal of Membrane Science*, 2020, vol. 597, pp. 117762. doi: 10.1016/j.memsci.2019.117762
9. Peng Z., Sun Y., Shi P., Wang Y. A mathematical model of the external circuits in a bipolar membrane electrodialysis stack: Leakage currents and Joule heating effect, *Separation and Purification Technology*, 2022, vol. 290, no. 2, pp. 120816. doi: 10.1016/j.seppur.2022.120816
10. Akberova E.M., Yatsev A.M., Kozhukhova E.Yu., Vasilyeva V.I. [Microscopic analysis of the surface of heterogeneous membranes with different degrees of ion exchanger dispersion after temperature exposure], *Kondensirovannyye sredy i mezhfaznyye granitsy* [Condensed matter and interphase boundaries], 2017, vol. 19, no. 2, pp. 158-165. (In Russ., abstract in Eng.).
11. Hu Y. Grand challenge in membrane applications: Liquid, *Frontiers in Membrane Science and Technology*, 2023, no. 2, pp. 1177528. doi: 10.3389/fmst.2023.1177528
12. Xie R., Feng L., Lei Z. [et al.] A Novel Thermoresponsive Catalytic Membrane with Multiscale Pores Prepared via Vapor-Induced Phase Separation, *Smart Porous Membranes*, 2018, no. 14, pp. 1703650. doi: 10.1002/sml.201703650
13. Luo X., Liu X., Wang Y. [et al.] Thermoresponsive membrane based on UCST-type organoboron polymer for smart gating and self-cleaning, *Journal of Membrane Science*, 2024, no. 693, pp. 122343.

14. Carraretto I. M., Ruzzi V., Lodigiani F. [et al.] Characterization of the physical properties of the thermoresponsive block-copolymer PAGB2000 and numerical assessment of its potentialities in Forward Osmosis desalination, *Polymer Testing*, 2023, vol. 128, no. 9, pp. 108238. doi:10.1016/j.polymeresting.2023.108238
15. Zhang X., Xiong S., Liu C. [et al.] Smart TFC membrane for simulated textile wastewater concentration at elevated temperature enabled by thermal-responsive microgels, *Desalination*, 2021, no. 500, pp. 114870. doi: 10.1016/j.desal.2020.114870
16. Filimonova A.A., Chichirova N.D., Chichirov A.A., Minibaev A.I. [Prospects for the use of electromembrane technologies in the energy sector], *Trudy akademenergo* [Proceedings of Academenergo], 2020, no. 2(59), pp. 55-76. (In Russ.).
17. Lazarev S.I., Kononov D.N., Galkina P.A., Malinin P.M. *Elektrobaromembranny apparat kombinirovannogo tipa* [Combined type electric baromembrane apparatus], Russian Federation, 2023, Pat. 2788625 (In Russ.).
18. Lazarev S.I., Kovalev S.V., Shestakov K.V., Khokhlov P.A. *Elektrodializator s okhlazhdeniyem razdelyayemogo rastvora* [Electrodialyzer with cooling of the separated solution], Russian Federation, 2019, Pat. 2690339 (In Russ.).
19. Pikuza V.I. *Ekonomicheskiye raschety i biznes-modelirovaniye v Exel* [Economic calculations and business modeling in Excel], St. Petersburg, Peter, 2012, 400 p. (In Russ.).
20. Azimov A.M., Kamshybaev A., Isabaev N.N. [Assessing the economic efficiency of the membrane method for preparing drinking water], *Central Asian Economic Review*, 2023, no. 2(149), pp. 117-128. (In Russ., abstract in Eng.).
-

Economic Assessment of the Application of Electrodialysis Method with Solution Cooling in Wastewater Treatment of Galvanic Products

S. I. Lazarev, O. V. Dolgova, K. V. Shestakov

Tambov State Technical University, Tambov, Russia

Keywords: galvanic waste; cooling; cleaning of drains; payback period; electrodialyzer with cooling of the solution.

Abstract: It is proposed to change the design of the electrodialyzer by integrating a cooling system, tubes passing through a block of ion-exchange membranes, through which cooling water is supplied through the internal volume of the device. The device and operating principle of the electrodialyzer are presented and compared with the prototype. The possibility of using an electrodialyzer with solution cooling in the process of purifying galvanic wastewater is considered. A process scheme for the purification of industrial solutions using an electrodialyzer with an increased membrane area and cooling has been proposed. The costs of operating the described scheme were assessed. The economic effect of implementation and the payback period of the technological process are calculated.

© С. И. Лазарев, О. В. Долгова, К. В. Шестаков, 2024