

УДК 542.816

Kopyrin Makar Pavlovich

Магистрант, аспирант кафедры «Водного хозяйства и технологии воды» Уральского
федерального университета

Master's student, postgraduate student of the Department of Water Resources and Water
Technology, Ural Federal University

Nikolaev Nikolay Alekseevich

кандидат экономических наук, доцент кафедры «Экономики труда и управления
персоналом»

Candidate of Economic Sciences, Associate Professor
Department of Labor Economics and Personnel Management

ОБЗОР ТЕХНОЛОГИЙ ПОЛУЧЕНИЯ ВОДЫ ДЛЯ ГЕМОДИАЛИЗА
REVIEW OF TECHNOLOGIES FOR PRODUCING WATER FOR
HEMODIALYSIS

Аннотация: Статья посвящена исследованию систем получения воды для гемодиализа с использованием устройств предочистки, мембран обратного осмоса и устройств доочистки. Методом сравнительного анализа исследованы способы получения воды для гемодиализа. Теоретически обосновано и рассчитано, что технология получения сверхчистой воды для гемодиализа с использованием систем двухступенчатого обратного осмоса и фильтров смешанного действия является наиболее экономически эффективной и позволяет получать воду требуемого качества.

Abstract: The article is devoted to the study of systems for obtaining water for hemodialysis using pre-treatment devices, reverse osmosis membranes and post-treatment devices. Methods for obtaining water for hemodialysis were studied using the method of comparative analysis. An original technology for producing ultrapure water for hemodialysis using reverse osmosis systems and mixed-action filters has been theoretically substantiated and proposed.

Ключевые слова: очищенная вода, вода для гемодиализа (сверхчистая вода), обратный осмос, деионизация, фильтр со смешанной смолой.

Key words: purified water, hemodialysis water (ultrapure water), reverse osmosis, deionization, and mixed resin filter.

Цель статьи – обзор и сравнение технико-экономических показателей современных способов получения сверхчистой воды для использования в установках гемодиализа и сравнение.

Актуальность исследования.

Термин «гемодиализ» подразумевает очищение крови у больных с почечной недостаточностью. Клинический успех гемодиализа неразрывно связан с использованием "искусственной почки" [2], [3], [4].

Системы очистки обратного осмоса являются традиционной составляющей подготовки сверхчистой воды [1]. Схема двухступенчатого обратного осмоса позволяет увеличить степень деионизации воды. Однако следует провести исследование можно ли заменить вторую ступень обратного осмоса электродеионизацией или смешанным фильтром и в чем преимущество последних [1], [5], [6].

Характеристика гемодиализа и описание способов получения сверхчистой воды для гемодиализа указано в работах: Леонова Б.И. [4], Смирнова А.В. [2,3], Калинина С.В. [5], Синкацу М. [6], Абдуллина И.Ш. [7], Гринвальда В.М. [8], Бахира В.М. [9], Rosemary.O. [11], Пантелеева А.А. [22], [12].

В изученных источниках не удалось обнаружить исследований, в которых приводится сравнение электродеионизаторов и смешанных фильтров. Отсутствуют данные о стоимости способов деионизации. Поэтому считаем изучение технологий доочистки для получения сверхчистой воды пригодной для гемодиализа актуальной научно-практической задачей.

Описание требований к сверхчистой воде для гемодиализа

Вода для гемодиализа как правило, получается из хозяйственного водопровода. Данная первичная (хозяйственная) вода применяется для промывания оборудования и инструментов, а также для получения более чистых типов воды (очищенной и для инъекций) [10]. Также эта вода может

быть использованной для первичной обмывки посуды, или при медицинском производстве, не имеющем строгого нормирования [13] [15] [16].

Вода для гемодиализа – обессоленная вода, которая используется для приготовления растворов, циркулирующих в установках гемодиализа и жидких средств дезинфекции и разбавления, промывки гемодиализного оборудования. Вода для гемодиализа должна быть безопасной в эпидемическом и химическом отношении, быть без присадок. Способами получения воды, используемой установками гемодиализа, являются выпаривание, ионный обмен, обратный осмос, также сочетание этих методов [8] [9].

Факторы требующие очистки водопроводной воды до воды пригодной для гемодиализа

Вода, протекающая в водопроводе, содержит мелкие частицы железа – вследствие коррозии поверхности труб, молекулярное железо Fe^{3+} присущее природной воде, микроорганизмы, крупную и молекулярную органику, хлор в разной форме, соли и ионы Ca^{2+} и Mg^{2+} и других элементов. Чтобы удалить эти элементы и получить сверхчистой воды пригодной для разбавления в установке «искусственная почка» применима обобщенная схема водоподготовки (см. Рис. 1).



Рис. 1 – Ключевые этапы получения воды для гемодиализа

Предочистка представляет собой удаление всех частиц кроме ионов поскольку крупные и мелкие механические частицы являются источником мутности воды. Эти элементы способны забивать клапаны, микрофилтры и разрушать мембраны обратного осмоса. Размер таких коллоидных частиц составляет десятые доли микрона, их состав может быть органический, или минеральный. Именно эти мельчайшие частицы способны постепенно уничтожить мембраны аппаратов обратного осмоса и вызвать рост электрической проводимости воды. Ионы металлов и ионы хлора, карбонат-ионы называются анионами (поскольку заряжены отрицательно) и катионы

(положительно заряженные ионы). Концентрация этих микрочастиц и составляет удельную электропроводность воды. Обратносмотические мембраны задерживают подавляющее большинство ионов. Доочистка подразумевает собой удаление малого остатка ионов и конечное обеззараживание воды.

1. Метод двухступенчатого обратного осмоса.

Данный метод применяется позволяет получить дистиллированную воду по ГОСТ 6709-72 «Вода дистиллированная». Однако стоит знать, что требования к воде для гемодиализа строже [14].



Рис.2 – Установка 2-ухступенчатого обратного осмоса

Достоинства 2-х ступенчатого обратного осмоса следующие:

- Меньшие затраты на электроэнергию;
- Малые расходы на эксплуатацию;
- Получение особо чистой воды;
- Возможен сбор концентрата 2 ступени и его возвращение в исходную воду перед установкой, что создает эффект роста отбора фильтрата, т.е. уменьшается выброс воды в канализацию.

Двухступенчатый о.о является надёжнейшим способом получения сверхчистой воды, и процессом, упрощающим работу устройств доочистки.

Существуют основные технологические схемы обратного осмоса с двумя ступенями:

Две ступени + буферная емкость;

Только 2 ступени;

Вариант с ёмкостью упрощает систему контроля, но контакт с воздухом фильтрата первичной ступени вызывает возрастание проводимости во вторичном пермеате.

Вода, подучаемая только двухступенчатым обратным осмосом, соответствует требованиям ГОСТ 6709-72 «Вода дистиллированная», однако вода для гемодиализа должна иметь меньшую проводимость и концентрацию металлов, поэтому ради безопасности пациентов следует применять осмос в сочетании с деионизацией воды.

2. Метод двухступенчатого осмоса в комплексе с установкой электродеионизации.

Основа работы электродеионизатора (ЭДИ) – постоянный электрический ток [19], [20].



Рис.3 – Установка электродеионизации.

Как в ФСД одновременно протекают реакции, так и ЭДИ имеет параллельные процессы:

- Электродиализ. Под действием постоянного электрического тока ионы кальция, железа и прочих элементов вместе с кислотными остатками «приходят» на электроды с противоположным знаком и сквозь ионпроницаемые мембраны отводятся в концентрат [17,18].
- Ионный обмен. Область между мембранами наполнена смесью катионита и анионита. Смола поглощает растворенные в воде ионы солей, отдавая анионы OH^- и катионы H^+ .
- Регенерация. Протекающий постоянный ток вызывает диссоциацию воды на ионы водорода и гидроксил-ионы, отчего смола восстанавливается [24,25,27].

Степень обессоливания на такой установке в совокупности с обратным осмосом составляет 99,9 %. Главный плюс ЭДИ заключается в малом расходе реагентов на восстановление обменной способности.

Также технология зачастую имеет существенный недостаток - высокую стоимость составляющую 50-60 % стоимости всей цепочки очистки. Фильтрат после ЭДИ имеет короткий срок чистоты, поэтому установку надо располагать вблизи потребителя [28,29].

3. Метод двухступенчатого осмоса в комплексе с фильтром смешанного действия [21].

ФСД позволяют деионизировать воду, и состоят из колонн с смолами анионитного и катионитного типов с блоком управления. Обычно деионизаторы бывают раздельного действия (катионо- и анионообменники) и смешанного действия.

Все ФСД подразделяются на:

- требующие регенерации;
- нерегенерируемые.

Регенерация в фильтрах происходит через ионообменные слои анионита и катионита. Фильтрация проходит под напором в H^+ катионитовых и OH^- анионитовых фильтрах. Регенерация происходит автоматически, когда

уменьшается объем смолы и приходит сигнал от управляющего клапана. После регенерации фильтр смешанного действия ФСД готов работать. [26,27,30]

Нереагентное обессоливание воды в ФСД (H⁺ OH⁻ фильтры) представляет собой одновременное действие анионита и катионита на воду. Поскольку не производится регенерация, то нет надобности в солевом баке и клапан управления. Применение различных смол таких как Lewatit UltraPure 1294, Lewatit NM-60 даёт различное качество фильтрата. Стоит помнить, что раз в полгода-год смола должна заменяться по причине потери обменной функции.

Можно сказать, что именно слоистое, смешанное расположение катионита и анионита даёт на выходе хорошо деионизированную воду со степенью 99,9...%, также близка к 7 величина рН [23,31,32]. Регенерация регенерируемого ФСД проводится после разделения анионита и катионита. Разделение проводят промывкой по направлению вверх, или заполнением реагентным раствором. Операция регенерации проходит легко при использовании ФСД в технологической схеме очистки несоленой воды, но контактируя с солёной водой возникают сложности. Контроль работы деионизаторов осуществляется измерением удельной электрической проводимости воды на выходе из системы.

Таблица 1

Характеристики методов доочистки воды

Название метода	2-х ступенчатый осмос (дистиляция)	2-х ступенчатый осмос + электродеионизация	2-х ступенчатый осмос + фильтр смешанного действия
Краткое описание технологии	+ Получение сверхчистой воды; + Общее солесодержание фильтрата ≤ 5 ppm; + Большая степень концентрирования, если степень использования воды является критическим параметром - Меньшая компактность и большая цена чем у одноступенчатого осмоса	+ Получение сверхчистой воды; + Общее солесодержание фильтрата $\leq 0,1$ ppm; + Неэнергоёмкость процесса, непрерывная регенерация, неистощаемость смолы; - Необходимость электрической энергии для работы; - Большая стоимость, составляющая в сочетании с осмосом большую долю стоимости.	+ Получение сверхчистой воды; + Общее солесодержание фильтрата $\leq 0,1$ ppm; + Компактность; + Не нужна регенерация на H^+/OH^- ;
Качество очищенной воды	ГОСТ 6709-72 «Вода дистиллированная»	ГОСТР 52556- 2006 «Вода для гемодиализа»	ГОСТР 52556- 2006 «Вода для гемодиализа»
Расход, м ³ /ч	Затраты единовременные, долл. США в год		
0,5-0,8 м ³ /ч	5000-6000	6000-15000	7400-9000
Расход, м ³ /ч	Затраты эксплуатационные, долл. США в год		
0,5-0,8 м ³ /ч			
Затраты на замену мембран/замена картриджей /замену катодов и анодов	10200-11300 [33]	8000-15000	1500-2000
Потребление электроэнергии, кВт/м ³ .	3-4 [35-39]	2[31]	-
Стоимость литра фильтрата, руб/л	0,04 [34]	0,04[31]	0,02

Выводы

Проведенный анализ показывает, что эффективность доочистки воды сочетанием обратного осмоса с электродеионизацией высока, однако это связано с большими денежными затратами и занимаемым пространством. В свою очередь фильтр смешанного действия обладает теми же характеристиками, но занимает объем равный колоннам умягчения или обезжелезивания, к тому же не требующий регенерации. Это делает сочетание метода обратного осмоса и ФСД более приемлемым вариантом получения сверхчистой воды в условиях экономии места и средств.

Библиографический список

1. Харченко А., Millipore, Современные технологии получения и хранения очищенной воды, Промышленность, стр.45, июль 2008 г. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/covremennye-tehnologii-polucheniya-i-hraneniya-ochischennoy-vody> (Дата обращения 10.10.2023).
2. Смирнов А.В., Заместительная почечная терапия, Науч.поп.приложение к журналу Нефрология. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/zamestitelnaya-pochechnaya-terapiya> (Дата обращения 12.10.2023).
3. Смирнов А.В., Лазеба В.А., Сапожников Д.Б., Концентрированный кислотный компонент, набор для его получения, концентрированный раствор кислотного компонента для получения гемодиализирующего раствора и способ его получения. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37746320> (Дата обращения 10.10.2023).
4. Леонов Б.И., Машков О.А., Веденков В.Г., Прилуцкий В.И., Оверченко А.В., Задорожний Ю.Г., Лир И.Л., Найда Н.Н., Бахир В.М., Устройство для гемодиализа. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=38003326> (Дата обращения 11.10.2023).
5. Калинин С.В., Урин Е.А., Устройство для очистки воды для медицинских целей методом обратного осмоса. URL: https://rusneb.ru/catalog/000224_000128_0000131713_20130827_U1_RU/ (Дата обращения 11.10.2023).

6. Синкацу М, Медицинская жидкость для консервативного лечения (варианты), способ её получения и диализное устройство (варианты). URL:https://rusneb.ru/catalog/000224_000128_0096115403_19981027_A_R U/ (Дата обращения 11.10.2023).
7. Абдуллин И.Ш., Р. Г. Ибрагимов, О. В. Зайцева, В. В. Парошин Плазменная модификация композиционных полимерных мембран для медицины, Прикладная химия и химическая технология, УДК 616.61-78. URL:<https://cyberleninka.ru/article/n/plazmennaya-modifikatsiya-kompozitsionnyh-polimernyh-membran-dlya-meditsiny> (Дата обращения 12.10.2023).
8. Гринвальд В. М., Теория и проектирование автоматизированной аппаратуры для гемодиализа, Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук, г. Москва, 2004 г. URL: <https://new-disser.ru/avtoreferats/01002626161.pdf> (Дата обращения 12.10.2023).
9. Бахир В.М., А.Г. Погорелов, Универсальная электрохимическая технология сбережения природы, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической и экспериментальной биофизики Российской академии наук, УДК 544.6 + 66, г. Пущино. URL: <https://www.emerald.eco/wp-content/uploads/2020/09/universalnaya-elektrohimicheskaya-tehnologiya-sberezheniya-prirody.pdf> (Дата обращения 12.10.2023).
10. Бушуев Е.Н., Н.А. Еремина, А.В. Жадан Современные системы водоподготовки для медицины и фармпроизводств. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-sovremennyh-tehnologiy-vodopodgotovki-na-tes> (Дата обращения 13.10.2023).
11. Rosemary O., Ward R., Ultrapure Dialysate for Home Hemodialysis?. URL: <https://www.sciencedirect.com/search?q=for%20Home%20Hemodialysis%3F> (Дата обращения 10.10.2023).

12. ГОСТ 52556-6 Вода для гемодиализа. Технические условия. URL: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/d5b/4293849464.pdf> (Дата обращения 10.10.2023).
13. URL: <https://www.runwater.ru/produkty/item/ustanovki-elektrodeionizacii-wts-runtech-edi> (Дата обращения 12.10.2023).
14. Литовка П.А., Жупиков В.А., Самыловский С.В., СПОСОБ ПОЛУЧЕНИЯ УЛЬТРАЧИСТОЙ ВОДЫ С СОПРОТИВЛЕНИЕМ 20 МОМ. URL: https://rusneb.ru/catalog/000224_000128_0002661590_20180717_C1_RU/ (Дата обращения 13.10.2023).
15. URL: <http://www.medfilter.ru/18mom.html> (Дата обращения 13.10.2023).
16. URL: <https://www.megalit23.ru/oborudovanie/oborudovanie-mwt/obratnyu-osmos-mwt-ro/> <https://tiwater.info> (Дата обращения 14.10.2023).
17. URL: https://www.ecounit.ru/sect_4057.html (Дата обращения 15.10.2023).
18. URL: <https://www.ecvols.ru/> (Дата обращения 14.10.2023).
19. Федоренко В.И., Производство ультрачистой воды методом непрерывной электродеионизации, ВНИИ Пищевой биотехнологии РАСХН, стр. 49-52, 2003 г. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22391005> (Дата обращения 13.10.2023).
20. Беликов С.Е., Водоподготовка справочник для профессионалов, стр.95, Москва 2007 г. URL: https://aquasorbent.ru/media/literature/original/00/00/1/vodopodgotovka_belikov_2007.pdf (Дата обращения 14.10.2023).
21. Пантелеев А.А., Рябчиков Б.Е., Жадан А.В., Хоружий О.В., Проектные решения водоподготовительных установок на основе мембранных технологий, стр.30-36, МЭИ, 2012 г. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/opyt-ekspluatatsii-membrannoy-vodopodgotovitelnoy-ustanovki> (Дата обращения 16.10.2023).
22. Водоподготовка в энергетике: учебное пособие для вузов /

23. А.С. Копылов, В.М. Лавыгин, В.Ф. Очков. – Москва: Изд-во МЭИ, 2003. – 309 с. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=19575003> (Дата обращения 16.10.2023) .
24. Водоподготовка для АЭС. Проектирование и расчет водоподготовительной установки: учебное пособие / В.А. Карелин; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – 98 с. URL: https://portal.tpu.ru/SHARED/v/VAKARELIN/Work/vodo/Tab4/Karelin_Vodopodgotovka_dla_AYS_Proekt_i_raschet_VPY_Pe.pdf (Дата обращения 16.10.2023) .
25. Технология подготовки воды для контуров котлов, парогенераторов, реакторов и систем их обеспечения: учебное пособие / Л.Л. Любимова, А.С. Заворин, А.А. Макеев; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 293 с. URL: https://spmi.ru/sites/default/files/imci_images/univer/svedenia_jb_organizacii/RPD_bakalavriat_2021/13_03_01_21/13.03.01-vodopodgotovka.pdf (Дата обращения 16.10.2023) .
26. Основные требования к применению ионитов на водоподготовительных установках тепловых электростанций. Технологические рекомендации по диагностике их качества и выбору. СТО ВТИ 37.002-2005. URL: <https://noriaqua.ru/files/normiruyushchie-dokumenty/СТО%20ВТИ%2037.002-2005> (Дата обращения 16.10.2023).
27. Ввод. в действие с 01.01.2006. – Челябинск: ООО Центр безопасности труда, 2005. – 28 с. URL: <https://www.uralsafety.ru/ntc-28.html> (Дата обращения 16.10.2023) .
28. Очков В.Ф., Второй водный химический форум, Водоочистка, Водоподготовка, Водоснабжение 2009/6, стр.4-7, МЭИ. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=12921365> (Дата обращения 16.10.2023).
29. Игнатущенко К. В., Филонов А. Г., О возможностях применения двухступенчатых схем обессоливания воды мембранными методами на

- ТЭС с парогазовой установкой в калининградском регионе, ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет». URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/o-vozmozhnostyah-primeneniya-dvuhstupenchatyh-shem-obessolivaniya-vody-membrannymi-metodami-na-tes-s-parogazovoy-ustanovkoy-v> (Дата обращения 16.10.2023).
30. Гречушкин А.Н, Особенности удаления бора при опреснении воды карского моря, ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана», стр. 79-82. URL: <http://csl.isc.irk.ru/BD/Журналы/океанология%202017%20№1/25-37.pdf> (Дата обращения 16.10.2023).
31. Чичирова Н.Д., Чичиров А.А., Вафин Т.Ф., Ляпин А.И., Филимонов А.Г., Технико-экономическая оценка эффективности использования электромембранных технологий на отечественных ТЭС, проблемы энергетики, 2012, № 11-12, стр.14-26. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tehniko-ekonomicheskaya-otsenka-effektivnosti-ispolzovaniya-elektromembrannyh-tehnologiy-na-otechestvennyh-tes> (Дата обращения 16.10.2023).
32. Поворов А.А., Корнилова Н.В., Платонов К.Н., патент Способ получения воды обессоленной. URL: https://rusneb.ru/catalog/000224_000128_0002411189_20110210_C1_RU (Дата обращения 16.10.2023).
33. Первов.А.Г., Спицов Д.В., Модернизация установок обратного осмоса, используемых для питьевого водоснабжения, с целью сокращения эксплуатационных затрат, НИУ МГСУ, УДК 628.16 : 62-278, стр.13. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/modernizatsiya-ustanovok-obratnogo-osmosa-ispolzuemyh-dlya-pitievogo-vodosnabzheniya-s-tselyu-sokrascheniya-ekspluatatsionnyh> (Дата обращения 17.10.2023).
34. URL: <https://prom-water.ru/articles/obratnyj-osmos-sebestoimost-litra-vody/> (Дата обращения 17.10.2023).

35. URL: <https://tano54.ru/product/ustanovka-obratnogo-osmosa-ro-40-2000-1-ch/> (Дата обращения 17.10.2023).
36. URL: <http://www.remotvet.ru/questions/12152-skolko-kvt-v-chas-potrebljaet-avtomatizirovannaja-sistema-ochistki-vody.html> (Дата обращения 17.10.2023).
37. URL: <https://filtr92.ru/kottedjy-i-basseyny/avant-ro-1-4021-low-ustanovka-obratnogo-osmosa> (Дата обращения 17.10.2023).
38. URL:
http://www.nano-plast.com/content/ustanovka_obratnogo_osmosa_aist_10 (Дата обращения 17.10.2023).
39. URL: https://bwt.nt-rt.ru/images/manuals/uo_3000_4000.pdf (Дата обращения 17.10.2023).