© Коллектив авторов, 2000
УДК 628.16:616-085.38-073.27.002.3

Е.А.Стецюк, С.Н.Петров, Б.В.Третьяков, Т.И.Носова

ВОДА ДЛЯ ГЕМОДИАЛИЗА

E.A.Stetsyuk, S.N.Petrov, B.V.Tretiakov, T.I.Nosova

WATER FOR HEMODIALYSIS

Медицинский центр Центрального банка России, Москва

Ключевые слова: гемодиализ, вода, контаминант, обратный осмос.
Key words: hemodialysis, water, contaminant, reversive osmosis.

Стандарт качества и водные контаминанты

Использовать неочищенную водопроводную воду для гемодиализа недопустимо. Водопроводная вода содержит большое количество контаминантов (загрязнителей), которые вызывают у диализных больных различные патологические проявления.

Поэтому контаминанты должны быть удалены. За 4 ч гемодиализа кровь больного через мембрану контактирует со 120 л диализата. Во всем мире в качестве стандарта для гемодиализной воды приняты требования AAMI (The Association for Advancement Medical Instrumentation), разработанные в США (табл. 1).Основные принципы этого стандарта мы считаем нужным изложить.

Любой контаминант становится опасным для больного, если его концентрация в диализате превышает концентрацию в крови. В *1-й группе* элементов стандарта находятся кальций, магний, натрий и калий. Эти вещества, в принципе, не являются ядами для больного. Их концентрация ограничивается лишь потому, что они могут оказать существенное влияние на конечный состав диализата после смешения воды и концентрата. Хотя синдром жесткой воды можно отнести и к токсическим эффектам, и к эффектам неправильного состава диализата [2, 3].

Во *2-й группе* — контаминанты, вредные эффекты которых хорошо известны и подтверждены научными исследованиями (табл. 2).

Остальные контаминанты — вещества, эффекты которых или не известны, или не доказаны при их концентрации ниже питьевого стандарта. Поэтому составители стандарта диализной воды прагматично установили предельно допустимую концентрацию на уровне $^1/_{10}$ от стандарта питьевой воды (барий, мышьяк, кадмий, хром, литий, ртуть, селен, серебро).

Таблица 1

Стандарт AAMI «Вода для гемодиализа»

Контаминант	Максимальный уровень
Кальций	2,0 (0,1 мэкв/л)
Магний	4,0 (0,3 мэкв/л)
Натрий	70,0 (3,0 мэкв/л)
Калий	8,0 (0,2 мэкв/л)
Фтор	0,2 мг/л
Хлор	0,5 мг/л
Хлорамины	0,1 мг/л
Нитраты	2,0 мг/л
Сульфат	100,0 мг/л
Медь	0,1 мг/л
Барий	0,01 мг/л
Цинк	0,1 мг/л
Алюминий	0,01 мг/л
Мышьяк	0,005 мг/л
Литий	0,005 мг/л
Серебро	0,005 мг/л
Кадмий	0,001 мг/л
Хром	0,014 мг/л
Селен	0,09 мг/л
Ртуть	0,0002 мг/л

Предварительная очистка

Очистка водопроводной воды для гемодиализа производится с помощью обратного осмоса как наиболее эффективного и экономичного метода. Принцип обратного осмоса следует знать специалистам в области гемодиализа, так как жизнь показывает, что полагаться полностью на технический персонал нельзя. Кроме того, необходимо знать, что требовать от технической службы, и заставлять их постоянно контролировать работу довольно сложной гидротехнической системы обратного осмоса.

Таблица 2

Токсические эффекты некоторых водных контаминантов

Контаминант	Токсический эффект	Минимальный токсический уровень (мг/л)
Алюминий	Диализная энцефалопатия, поражение костей	0,06
Хлорамины	Гемолиз, анемия, метгемоглобинемия	0,25
Медь	Тошнота, ощущение холода, повреждение печени, гемолиз	0,49
Фтор	Остеомаляция, остеопороз	1,0
Нитраты	Метгемоглобинемия, гипотензия, тошнота, цианоз	21,0
Сульфат	Тошнота, рвота, ацидоз	200,0
Цинк	Анемия, тошнота, рвота, лихорадка	0,2
Микроорганизмы	Фебрильные реакции	–
Углеводороды	Потенциальный канцерогенез	–

Обычно водопроводная вода поступает во входной резервуар, а оттуда насосом подается на предварительную очистку, которая называется претритмент (от англ. pretreatment). Наличие входного бака и насоса особенно важно при низком давлении водопроводной воды. Входной бак позволяет при отключении водоснабжения спокойно продолжить гемодиализ и закончить его без аврала (рис. 1).

Фильтры непосредственно обратного осмоса очень деликатные, поэтому перед ними имеется система предварительной очистки воды — претритмент.

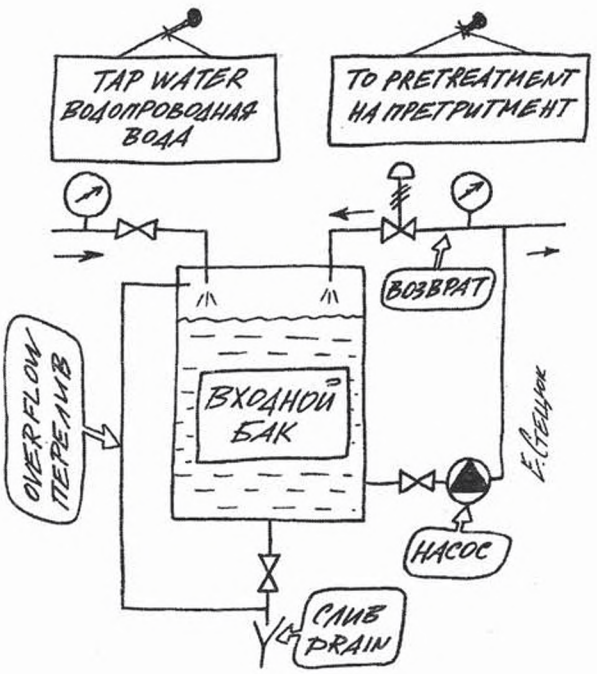

Рис. 1. Входной бак.

Претритмент является важным участком работы системы обратного осмоса. От него полностью зависит работа непосредственно фильтра обратного осмоса.

Первым элементом претритмента является песчаный фильтр. Он должен задержать все взвешенные частицы, успешно преодолевшие фильтры водопроводной станции или присоединившиеся к воде по дороге к потребителю (рис. 2).

О степени загрязненности песчаного фильтра можно судить по разнице давлений на входе и выходе из фильтра. Естественно, что песчаный фильтр не может бесконечно накапливать грязь, поэтому наверху песчаного фильтра имеется устройство для регенерации песчаного фильтра обратной промывкой (back wash), которая достигается путем переключения подачи воды в обратном направлении (рис. 3).

Песок, спрессованный давлением воды и содержащий задержанные частицы, как бы встряхивается , и все, что накопилось в песке, поступает на слив. Важно, чтобы давления

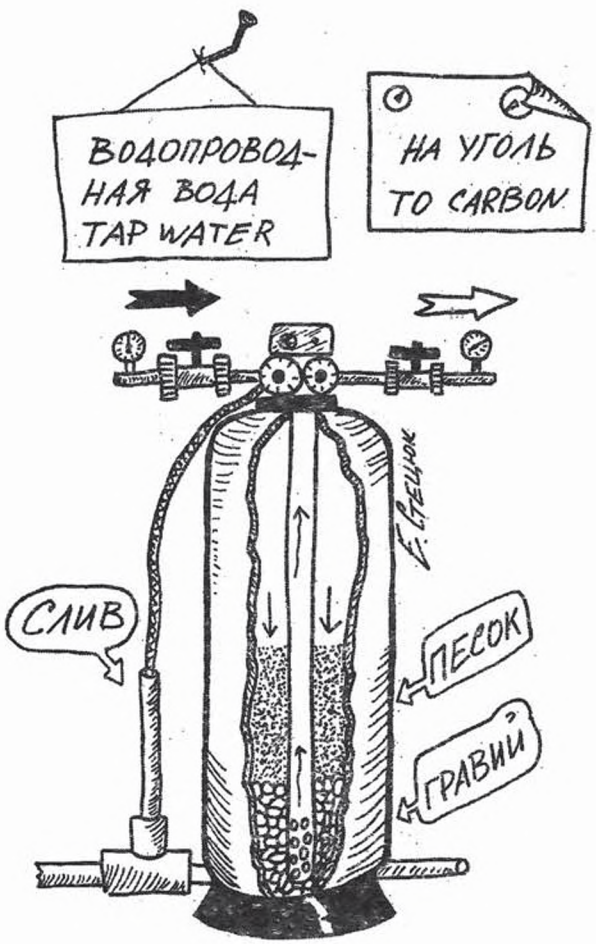

Рис.2. Работа песчаного фильтра.

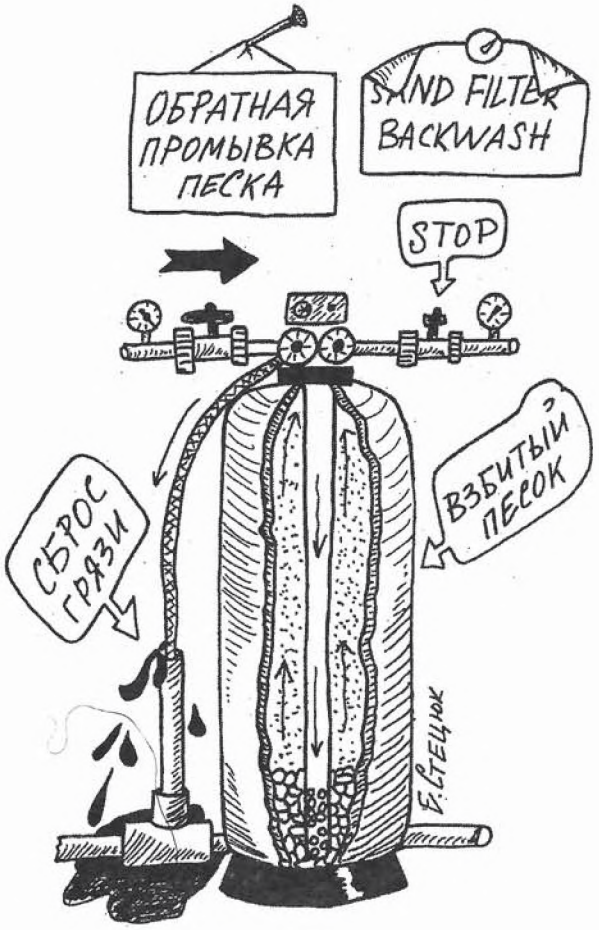

Рис. 3. Обратная промывка песчаного фильтра.

входного насоса хватало для обратной промывки всей толщи песка. Поэтому нельзя чрезмерно набивать колонну песком. С целью перестраховки мы рекомендуем программировать обратную промывку песка ежедневно, желательно во внедиализное время, так, впрочем, следует проводить регенерацию и всех других элементов системы. Совсем нелишне иногда визуально проконтролировать дренируемую воду во время обратной промывки. Это позволит достаточно объективно оценить эффективность регенерации. Кроме того, в некоторых системах существует программа регенерации песчаного фильтра раствором перманганата калия. При правильной эксплуатации песчаный фильтр работает неограниченно долго, принимая на себя всю механическую грязь водопроводной воды, в том числе железистые гели, опасные для диализной гидравлики, хотя качество воды песчаный фильтр практически не улучшает.

Некоторые фирмы для удаления соединений железа устанавливают в претритменте специальный фильтр. Обычно песчаный фильтр содержит специальный «зеленый» песок, который периодически регенерируется раствором перманганата калия, что восстанавливает способность «зеленого» песка задерживать соединения железа. И все-таки жизнь показывает, что песчаный фильтр следует хотя бы раз в 1–2 года перебирать. Ведь контейнер песчаного фильтра непрозрачный и по данным приборов затруднительно точно оценить состояние песка, сколь эффективна обратная промывка. А при переборке можно визуально исследовать все содержимое фильтра и механически под непосредственным контролем промыть песок. Гравий от песка легко отделить с помощью мелкой сетки. Хотя, конечно, переборка песчаного фильтра — работа грязная.

На дне всех фильтров претритмента имеется гравиевая подушка, препятствующая мелким элементам шихты забивать тонкие отверстия в трубе, которая отводит отфильтрованную воду. Уровень гравия в контейнере должен быть выше, чем уровень отверстий в отводящей трубе. Желательно, чтобы размер гравия не превышал 0,5 см. Как кашу маслом, так и фильтр гравием не испортишь — ведь гравий не осаждает из воды частицы и практически не редуцирует давление.

После песчаного фильтра вода поступает в колонну с активированным углем (рис. 4). Угольный фильтр ничего не осаждает и является чисто сорбционным. Он предназначен для сорбции органических соединений и соединений хлора.

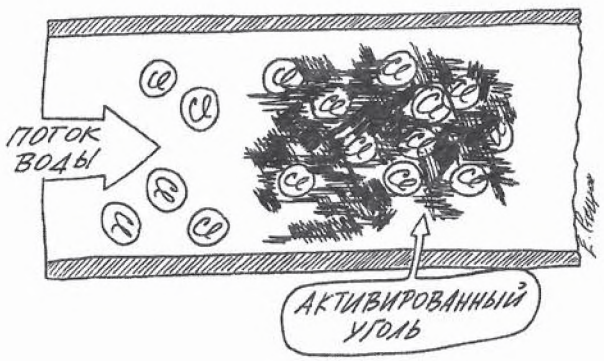

Рис. 4. Принцип очищения воды угольным фильтром.

Так как угольный фильтр не является осаждающим, редукция давления воды на нем незначительна и в процессе работы не нарастает (рис. 5).

Нормальная работа угольного фильтра является важным фактором улучшения качества воды. Работу угольного фильтра следует контролировать путем сравнения содержания хлора на входе и выходе из фильтра. Специальным набором для этого исследования обязана обес-

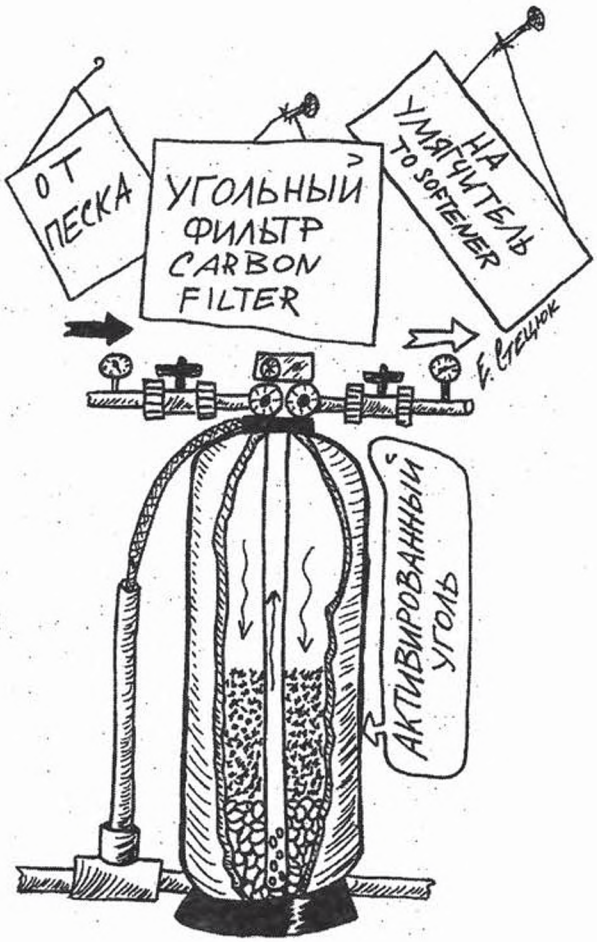

Рис. 5. Работа угольного фильтра.

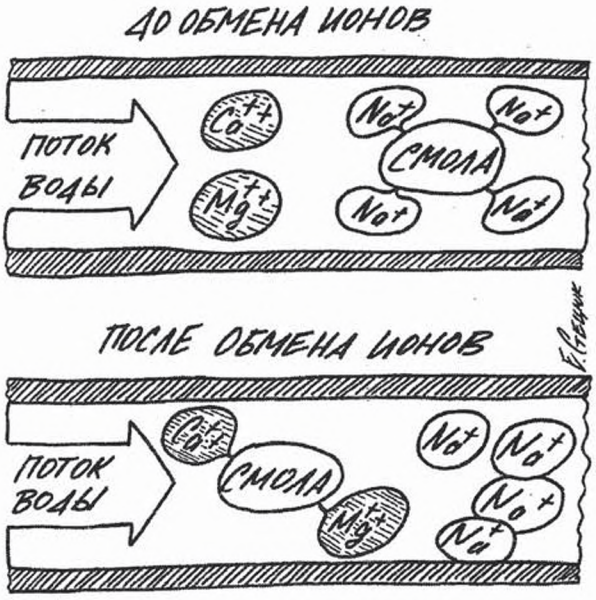

Рис. 6. Принцип работы ионообменной смолы умягчителя.

печить фирма-поставщик. *Угольный фильтр — наиболее коварный элемент всей системы.* Коварство его заключается в том, что при определенной насыщенности хлором уголь начинает его активно отдавать, и вместо очистки воды уголь может отравлять воду. Особенно настороже следует быть в период паводка, когда контаминация воды максимальна. Если содержание хлора на выходе из угольного фильтра больше или равно входной концентрации, колонну следует загрузить новым углем, а старый уголь выбросить.

Последним этапом претритмента является умягчитель — устройство, освобождающее воду от ионов жесткости — кальция и магния. В качестве умягчителя используется ионообменная смола, которая меняет ионы кальция и магния на ионы натрия (рис. 6).

Понятно, что по мере того, как смола насыщается ионами жесткости, ее следует регенерировать.

Регенерация умягчителя производится насыщенным раствором хлористого натрия, а промывная вода с кальцием и магнием уходит на слив (рис. 7).

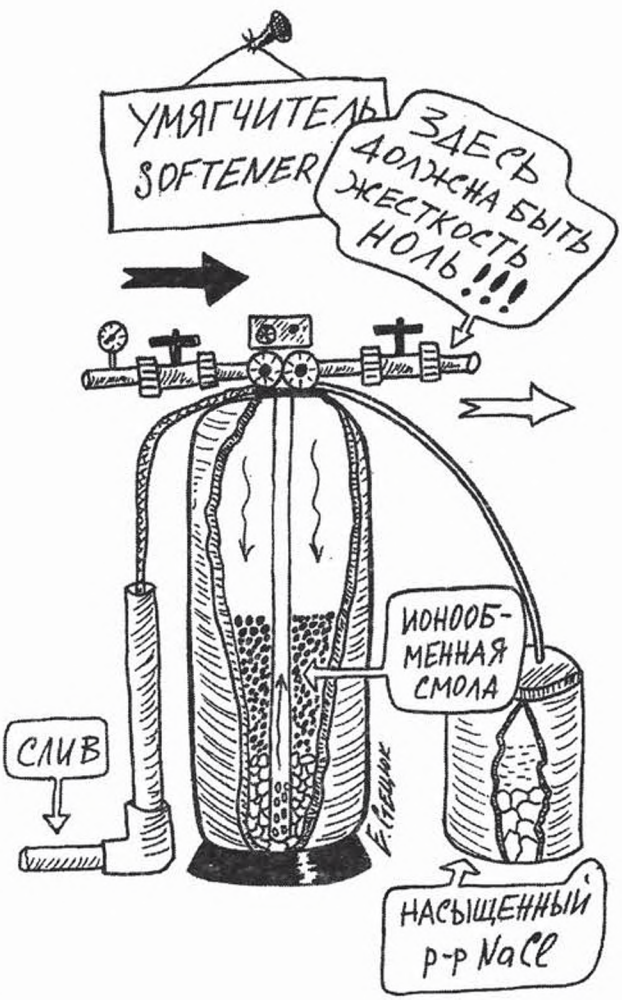

Рис. 7. Умягчитель.

Крайне важно следить за тем, чтобы в резервуаре для регенерации умягчителя постоянно находилась соль. Обычно для этой цели используют специально спрессованные таблетки из хлористого натрия. Работу умягчителя следует контролировать по фактическому содержанию ионов жесткости на выходе из умягчителя. Реактивы для этой цели также должны быть приложены к системе. Обычно на выходе из умягчителя допускаются лишь следы ионов жесткости. Существенное содержание ионов жесткости в воде обратного осмоса может повлиять на состав диализата по кальцию и магнию. Ведь навеска солей концентрата рассчитана на полностью деионизированную воду. Частота регенерации умягчителя устанавливается по потребности. Особенно внимательно надо контролировать работу умягчителя в период паводка. В это время жесткость водопроводной воды возрастает существенно.

Если в воде для гемодиализа кальция и магния нет, это не ваша заслуга, а заслуга мембраны обратного осмоса. Вы должны добиться отсутствия жесткости именно после умягчителя.

Умягчитель может быть опасен, если насыщенный раствор хлористого натрия, которым регенерируется ионообменная смола, удален из устройства не полностью. В этом случае выброс в гидравлику хлористого натрия может привести к существенному повышению кондуктивности диализата разом во всех мониторах.

Итак, мы подходим к концу описания претритмента. Для дополнительной страховки после трех колонн претритмента желательно иметь осаждающий 5-микронный фильтр.

Необходимость этого фильтра обусловлена тем, что во время регенерации элементов претритмента в системе могут возникать гидравлические удары, которые способны вызвать выброс шихты из претритмента. А попадание песка, угля или ионообменной смолы непосредственно в блок обратного осмоса крайне нежелательно. Прозрачный корпус страхового фильтра позволяет визуально это контролировать.

Обратный осмос

Пройдя претритмент, вода в значительной степени очищена и вполне пригодна для очистки уже непосредственно обратным осмосом. Под большим давлением, 10–20 атм, специальным насосом вода подается на мембранный фильтр (рис. 8).

Кстати, многие не понимают, почему принцип очистки воды называется обратным осмосом. Дело в том, что вследствие высокого давления через мембрану в первую очередь проходит вода как наиболее низкомолекулярное вещество. Ведь ее относительная молекулярная масса составляет всего 18 дальтон, а вещества с более высокой молекулярной массой как бы отсекаются мембраной. Чем выше молекулярная масса контаминанта, тем в большей степени он отбрасывается мембраной. В зависимости от молекулярной массы отсечка на мембране варьирует от 90 до 99%. Естественно, что натрий, имеющий массу 23 дальтона, отсекается в меньшей степени. Таким образом, вода движется не в сторону большей концентрации, как это происходит при нормальном осмосе, а в сторону меньшей концентрации, т. е. в обратную сторону. Поэтому и осмос называется обратным. По существу процесс обратного осмоса можно назвать гиперфильтрацией.

В блоке обратного осмоса различают три вида воды:

— фид (питающая вода);
— пермеат (очищенная вода);
— концентрат (отшлакованная вода).

На мембране обратного осмоса отшлаковывается до 50% всего фида. Качество пермеата обычно контролируется по электропроводности. При нормальной работе обратного осмоса кондуктивность (электропроводность) пермеата не превышает 5–6 микросименсов (мкСм).

Мембрана обратного осмоса периодически промывается в режиме флаш (от англ. flash), когда фид не под давлением, а с большой скоростью подается вдоль мембраны обратного осмоса, очищая мембрану от наслоений.

После обратного осмоса вода поступает в накопитель чистой воды, обычно большой ем-

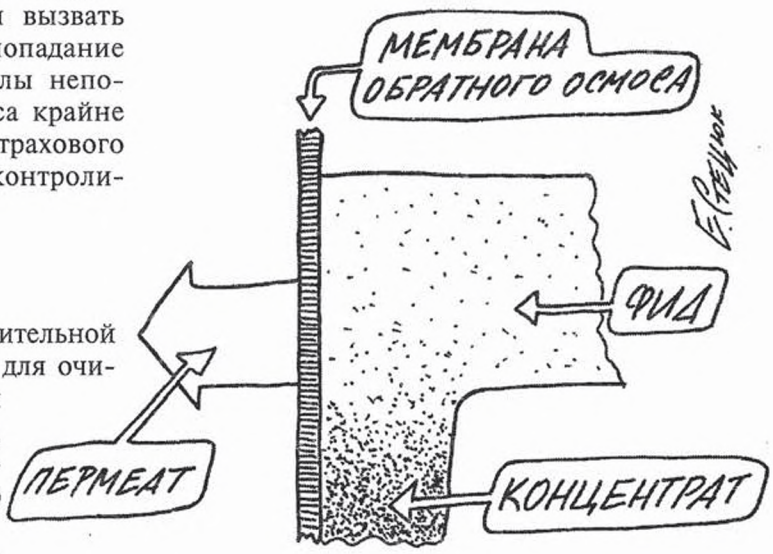

Рис. 8. Принцип работы блока обратного осмоса.

кости — около 1 м^2 и больше (рис. 9). Из накопителя вода подается в распределительную петлю к мониторам.

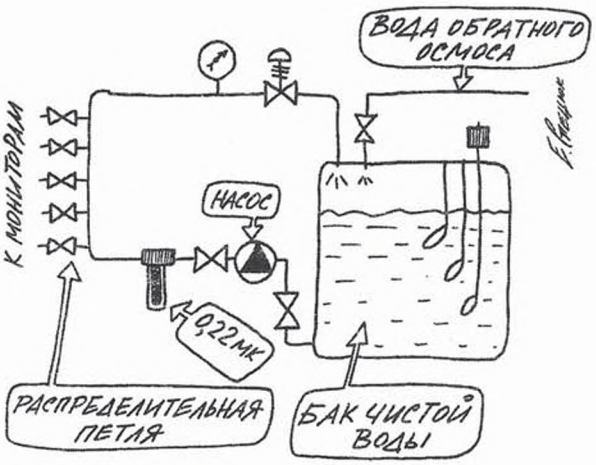

Рис. 9. Бак чистой воды и распределительная петля.

В распределительную петлю нередко устанавливают фильтр, мембрана которого задерживает бактерии. Размер пор этой мембраны составляет всего 0,22 мкм. Стандарт AAMI допускает содержание в воде для гемодиализа до 200 колониеобразующих клеток в 1 мл. В отработанном диализате в конце процедуры допускается наличие 2000 клеток в 1 мл.

В принципе простерилизовать гидравлику обратного осмоса нетрудно. Для этого в системе имеется специальный стерилизационный порт, куда закладываются таблетки со стерилизантом. Но тогда возникает другой вопрос: как эффективно отмыть из системы стерилизант? Это уже не так просто. Кроме того, необходимо проконтролировать, отмылся ли он полностью. В практической работе эффективным способом контроля бактериальной контаминации гемодиализной воды является интенсивная диализная работа в две смены ежедневно. *При застое воды вся гидравлика обратного осмоса превращается в инкубатор бактериального роста.* И это, к сожалению, факт. В качестве доказательства приводим данные проф. Y. Berland, который исследовал концентрацию эндотоксина на разных этапах очистки воды (рис. 10) [4].

Обратите внимание, что после прохождения водой угольного фильтра в ней существенно возрастает уровень эндотоксина. По существу уголь отравляет воду эндотоксином, который отсекается только мембраной обратного осмоса. В последние годы борьбе с бактериальной контаминацией диализата уделяется очень большое внимание. Ведь при проведении гемодиализа с высокопроницаемыми мембранами (хай-флакс) значительное количество контаминантов, в том числе и эндотоксин, могут попадать из диализата в кровь. При работе с низкопроницаемыми (лоу-флакс) мембранами эта опасность минимальна, так как эндотоксин представляет собой липополисахарид с большой молекулярной массой и мембрана лоу-флакс для эндотоксина практически непроницаема [1, 5].

Все части описанной системы связаны между собой сетью труб, кранов, датчиков. Все это устройство обычно управляется микропроцессором, который контролирует включение насосов и периодически по заданной программе производит регенерацию элементов системы по ночам и в выходные дни. Системы очистки воды обычно комплектуют мини-лабораториями для контроля качества воды на всех этапах. И хотя контроль за работой установки обычно ведет инженер, врачам необходимо знать весь процесс, чтобы с пониманием требовать от технической службы соблюдения качества воды для гемодиализа. Ведь за состояние больных отвечает не инженер, а...

Заключая краткое изложение необходимых для врача сведений по технологии обратного осмоса, считаем нужным подчеркнуть, что в первую очередь должна быть отлажена работа именно претритмента, иначе все контаминанты будут отсекаться на мембране обратного осмоса, и эта весьма дорогая часть системы быстро выйдет из строя.

Любая система обратного осмоса нуждается в постоянном контроле и коррекции по фактическим результатам работы ее элементов и по конкретному состоянию водопроводной воды.

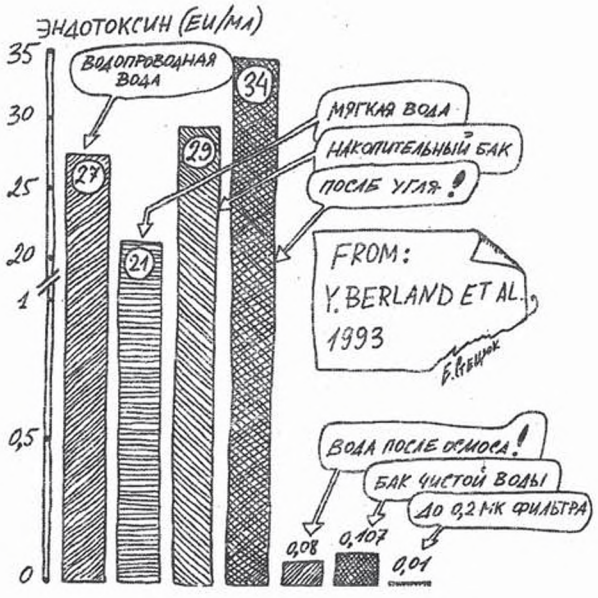

Рис. 10. Содержание эндотоксина в воде на различных этапах очистки воды.

Мы нередко представления не имеем, что может находиться в водопроводной воде, особенно в время паводка.

Постарайтесь непременно протестировать воду на содержание алюминия. При чрезмерной концентрации алюминия в водопроводной воде бессмысленно заниматься лечением энцефалопатии, остеодистрофии и анемии.

И еще раз напомним: не забудьте спросить у фирмы-поставщика системы обратного осмоса мини-лабораторию. Фирма обязана ее поставить. Содержание общего хлора, жесткость, железо и pH воды вы должны контролировать в любое время и на любом этапе очистки воды. Это неотъемлемая часть клинической работы диализного врача, потому что если вы не будете контролировать воду, то кто?

Производительность системы обратного осмоса сильно зависит от температуры входной воды (рис. 11).

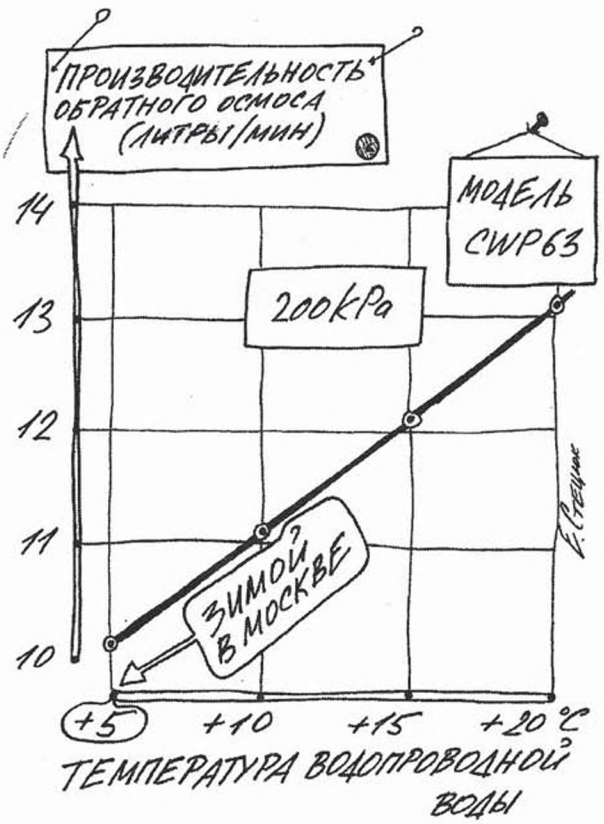

Рис. 11. Зависимость производительности обратного осмоса от температуры питающей воды (фида).

В паспортных данных обычно указывают производительность системы при температуре 25 °С. Поэтому в российских условиях, например, в Москве, когда зимняя температура воды около +5 ° С в течение многих месяцев, при заказе системы обратного осмоса надо учесть зимнюю температуру воды. Иначе зимой может возникнуть дефицит чистой воды.

Качество пермеата в определенной степени зависит от перепада давления на мембране обратного осмоса (рис. 12).

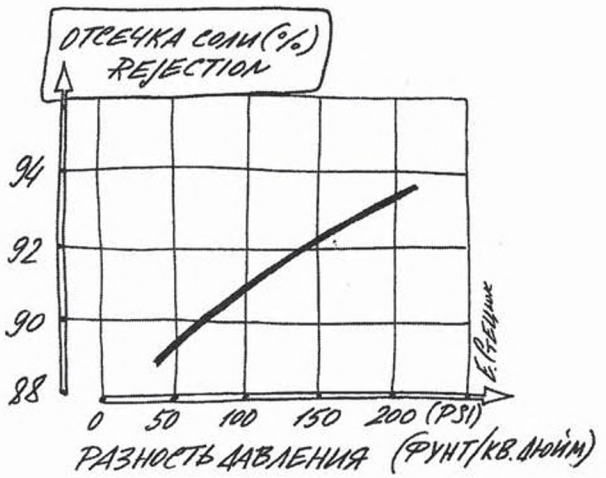

Рис. 12. Зависимость кондуктивности фида от перепада давления на мембране обратного осмоса.

Поэтому надо следить за давлением на мембрану, чтобы оно не было слишком низким.

Эффективность работы мембраны обратного осмоса оценивается по проценту отсечки R (%):

$$R\ (\%) = \frac{\text{кондуктивность фида} - \text{кондуктивность пермеата}}{\text{кондуктивность фида}} \times 100\%.$$

Иногда возникает вопрос, можно ли использовать дистиллированную воду для приготовления диализата. Конечно, можно. Но дистилляция — процесс чрезвычайно энергоемкий, что делает воду для гемодиализа слишком дорогой. Кроме того, чтобы приготовить таким образом необходимое количество воды, вам придется дополнительно строить трансформаторную подстанцию.

Мониторинг обратного осмоса

Вот, наконец, вам смонтировали и запустили новую систему очистки воды обратным осмосом. Все отлично, представители фирмы с гордостью показывают, что пермеат имеет необыкновенно низкую кондуктивность, просто диэлектрик. Не обольщайтесь! «Первач» он всегда очень высокого качества, даже если в систему поступает сточная вода из канализации. Проблемы начнутся, когда поставщики разъедутся и вы со своим осмосом останетесь один на один.

Чтобы понимать, что происходит с системой и окончательно отладить ее работу по факту, необходимо мониторировать все элементы очистки воды (табл. 3). И только так!

В журнале «Contemporary Dialysis and Nephrology» за декабрь 1997 г. читателю предлагают вести специальную таблицу наблюдения за работой системы обратного осмоса (табл. 4).

Попробуйте вести такой дневник наблюдений. Может получится?

Таблица 3

Мониторинг системы обратного осмоса

Этап очистки	Параметр	Производный параметр	Частота
Песок	Давление на входе		
	Давление на выходе	Падение давления *	Ежедневно
	Поток воды		Ежедневно
Умягчитель	Жесткость воды на выходе	–	Ежедневно
Угольный фильтр	Давление на входе		
	Давление на выходе	Падение давления	Ежедневно
	Концентрация хлора на выходе		Ежедневно
Обратный осмос	Кондуктивность фида		Ежедневно
	Кондуктивность пермеата	Процент отсечки	Ежедневно
	Поток фида		
	Поток пермеата		
	Давление на входе	Процент выхода **	Ежедневно
	Давление на выходе		Ежедневно
	Температура фида	Падение давления	Ежедневно

* Падение давления есть разность давления воды на входе и выходе.

** Процент выхода = (поток пермеата/поток фида) × 100%.

Таблица 4

Данные наблюдений за работой системы обратного осмоса

Дата	Температура	pH	Давление перед песком	Давление после песка	Входное давление	Выходное давление	Кондуктивность пермеата	Процент отсечки	Поток пермеата	Поток концентрата

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Hoshino M., Hosoya N., Sasaki M., et al. Development of the new blood purification system with fluid purification «Recycle Filtration System: RFS» // Jpn. J. Artif. Organs.—1997.—Vol. 26.—P. 147–152.

2. Ismail N., Becker B.N., Hakim R.M. Water treatment for hemodialysis //Am. J. Nephrol.—1997.—Vol. 16.—P. 60–72.

3. Laurence R.A., Lapierre S.T. Quality of hemodialysis water // Amer. J. Kidney Dis.—1996.—Vol. 25.—P. 738–750.

4. Layman-Amato R. Disinfection of an RO system: Clearing the issues // Dial. Transplant.—1995.—Vol. 24.—P. 244–246.

5. Tsuchida K., Takemoto Y., Yamagami S., et al. Detection of peptidoglican and endotoxin in dialysate, using silkwarm larvae plasma and limulus amebocyte lysate methods // Nephron.—1995.—Vol. 75.—P. 438–443.

Поступила в редакцию 28.01.2000 г.