

Оборудование химико-фармацевтических производств, механизация и автоматизация технологических процессов

© В. И. Федоренко

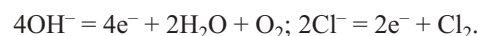
В. И. Федоренко

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИИ EDI-СИСТЕМ ВОДОПОДГОТОВКИ

ВНИИ пищевой биотехнологии РАСХН, Москва

Основой EDI (Electrodeionization) -процесса является деионизация потока исходной воды в слоях катионита и анионита, размещенных между ионселективными мембранами, при непрерывной регенерации ионита в поле постоянного тока. В основном EDI-установки предназначены для доочистки RO-пермеата (Reverse Osmosis – обратный осмос) до уровня ультрачистой воды [1]. На рис. 1 показан внешний вид EDI-установки производительностью 22 м³/ч. Установка состоит из восьми EDI-модулей производительностью 2,75 м³/ч каждый. Поток исходной воды поступает через входной штуцер в распределительный коллектор и далее в каждый EDI-модуль. На выходе из EDI-модулей деионизованная вода поступает в коллектор чистой воды. На линии выхода чистой воды установлены датчики давления и расхода, а также выходной вентиль. Проходя через D-каналы (деминерализации) EDI-модуля, растворенные ионы вступают в обменные реакции на поверхности зерен ионита и перемещаются в поле постоянного электрического тока к соответствующим по поляризации ионселективным мембранам. Проходя через мембраны в C-каналы концентрата, ионы отводятся в коллектор концентрата. Этот коллектор собирает потоки концентрата с каждого EDI-модуля и объединяет их в замкнутый контур рециркуляции (см. рис. 2), на котором смонтирован датчик давления, расходомер и циркуляционный насос, основной задачей которого является поддержание заданного давления и скорости потока в C-каналах. Часть концентрата отводится из циркуляционного контура на вход RO, а вместо него вводится такое же количество исходной воды или электролита, например раствора NaCl. Величина TDS концентрата должна обеспечивать достаточно высокую электропроводность в D и C-каналах, но не превышать критического значения концентрационной поляризации (КП). Концевые E-каналы электролита содержат электроды, которые совместно с последней мембраной образуют E-канал. Проходя через E-каналы, поток концентрата (Q_E) обогащается трансмембранным ионным потоком от замыкающей мембраны. В катодный E-канал попадает также небольшое количество газообразного водорода, образующегося в результате восстановления протонов на катоде: $2H^+ + 2e^- = H_2$. В анодный E-канал попадает небольшое количество газообразного кисло-

рода и хлора, образующихся в результате окисления хлорид и гидроксил-ионов:



Поток из E-каналов отводится в дренаж, чтобы предотвратить хлорную и кислородную деструкцию мембран.

Производительность EDI-установки определяется количеством размещенных в ней модулей, которые являются автономными аппаратами (рис. 3). Модульно-блочный принцип построения позволяет выводить из эксплуатации один или несколько EDI-модулей, без остановки производства. Для контроля рабочего давления на линиях нагнетания исходной воды и циркуляции концентрата устанавливаются датчики давления. На пульте управления размещен PLC-контроллер (Programmable Logic Controller), КИП, кнопки ручного управления, переключатели и световая индикация. В автоматическом режиме управление EDI-процессом осуществляется PLC-контроллером, который считывает цифровую информацию от датчиков контролируемых параметров, сравнивает ее с заданным алгоритмом управления и выдает команды на соответствующие регулировки этих параметров. Контрольная панель оператора непосредственно связана PLC-контроллером, что позволяет оператору, помимо пуска и остановки, контролировать текущий статус EDI-процесса, соотношение эксплуатационных параметров, вовремя отреагировать на сигнал “Тревога”.

Эффективность EDI-процесса во многом определяется разностью электропроводности потоков исходной воды и концентрата. Чем меньше электропроводность исходной воды и чем больше электропроводность концентрата, тем выше скорость переноса ионов из D в C-каналы. Для увеличения электропроводности концентрата в циркуляционный контур дозируется расчетное количество сильного электролита. Этот технологический прием довольно часто используется при высоком содержании в исходной воде соединений B, SiO₂ и CO₂. Блок дозирования электролита состоит из расходной емкости, насоса-дозатора и устройства ввода с элементами гидродинамического перемешивания.

На случай если EDI-система не позволяет в какой-то момент получать воду с заданной степенью очистки, предусмотрен автоматический возврат потока очищенной воды через соленоидные вентили на линиях

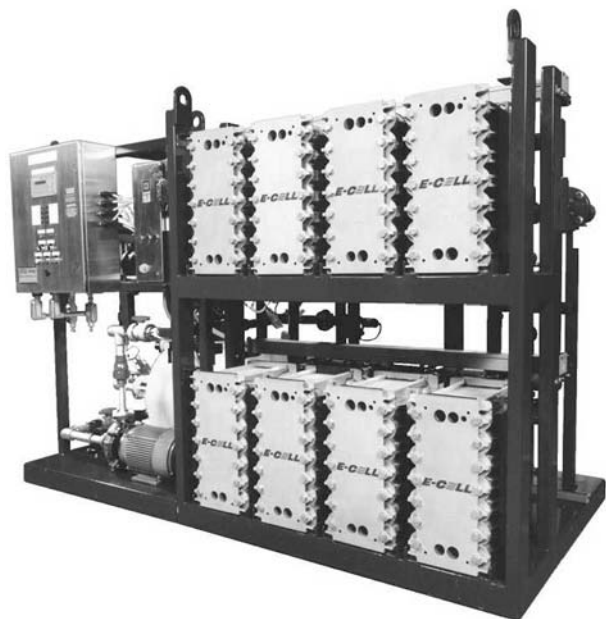


Рис. 1. Внешний вид EDI-установки производительностью 22 м³/ч

выхода очищенной воды и ополаскивания. Если электропроводность очищенной воды соответствует заданному значению, то вентиль на линии выхода открыт, а на линии ополаскивания закрыт, очищенная вода поступает из EDI-системы в накопительные резервуары. Если электропроводность очищенной воды ниже заданного значения, то вентиль на линии выхода закрывается, а на линии ополаскивания открывается, при этом поток воды отводится либо на вход EDI-системы, либо на вход RO.

Высокая скорость потока в С-каналах является необходимым условием поддержания низкого уровня КП и предотвращения осадкообразования на поверхности мембран. Поэтому к циркуляционному насосу предъявляются довольно жесткие требования, как по конструкционным материалам, так и по расходным характеристикам. Как правило, это — многоступенчатые центробежные насосы с рабочими колесами из специальной стали или керамики с достаточно пологой расходной кривой, чтобы исключить возможность гидроударов в случае возникновения кратковременных тупиковых режимов эксплуатации. Типоразмер циркуляционного насоса подбирается из расчета потока подачи $0,3 - 0,4 Q_{yч}$ и рабочего давления до 3 ат, плюс сопротивление самого контура, где $Q_{yч}$ — поток ультрачистой воды. Для внутренней обвязки блоков EDI-системы применяются PVC-трубопроводы на 10 ат, являющиеся электроизолятором, что повышает электробезопасность.

В EDI-установках используется запорная и регулирующая арматура из пластика, аналогичного материалу сопряженных трубопроводов. Конструкция и типоразмер вентиля определяются их технологическим назначением и производительностью EDI-установки. Для регулирования величины потока используются диафрагменные вентили. Для более точной и плавной

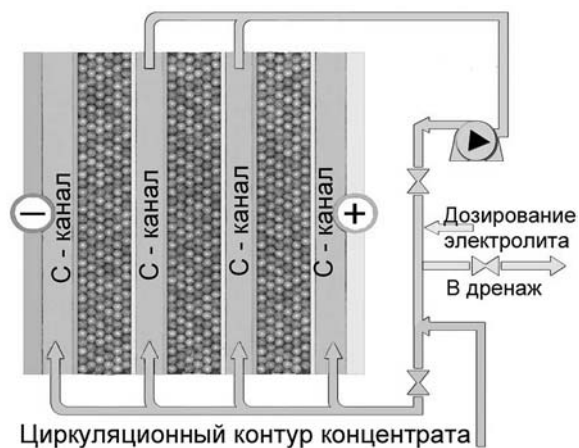


Рис. 2. Контур рециркуляции концентрата

регулировки необходимо, чтобы их типоразмер максимально соответствовал реальной величине потока. В качестве запорных применяются шаровые краны и краны типа “бабочка”.

Электропитание катодных и анодных цепей EDI-установки осуществляется штатным блоком постоянного тока с сетевыми фильтрами и распределительными линиями ко всем EDI-модулям. Запитывается блок выпрямления 3-фазным током 380 В; 50 Гц. На контрольной панели блока размещены вольтметр и амперметр, регуляторы напряжения и силы тока, с помощью которых оператор может регулировать основные технологические параметры EDI-процесса. Рабочее давление на входе и выходе в D, C и E-каналы контролируется с помощью датчиков давления. Потoki исходной и очищенной воды, циркуляции, отвода и инъекции концентрата, а также инъекции раствора электролита контролируются электрическими ротаметрами. Сигнал от ротаметра используется для управления соленоидным клапаном, что позволяет поддерживать величину потока в заданном диапазоне.

В качестве блоков подготовки в состав EDI-системы могут входить многослойные и карбоновые фильтры, блоки обезжелезивания и умягчения, контрольные фильтры с рейтингом 5 – 8 мкм, установки обратного осмоса, блоки асептики и накопительные резервуары. Исходная вода подается на вход EDI-установки либо напрямую из линии RO-пермеата, либо буcтерным насосом из накопительного резервуара, при этом давление в линии подачи не должно превышать величину рабочего давления в EDI-установке. Для поддержания минимального уровня микробного загрязнения на линии входа устанавливается UV-стерилизатор или блок дозирования дезинфектанта, состав и концентрация которого должны быть согласованы с изготовителем EDI-системы и отражены в технологическом регламенте.

Деионизованная вода после EDI-системы поступает либо в накопительный резервуар, либо в линию раздачи к точкам потребления, либо в циркуляционный контур ультрачистой воды, либо, при необходимости, на контрольный MB DI-фильтр (Mixed Bed Deionization –

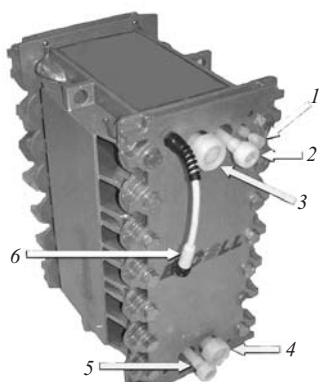


Рис. 3. Узлы подключения EDI-модуля: 1 — выход электролита; 2 — выход концентрата; 3 — выход деионизованной воды; 4 — вход исходной воды; 5 — выход концентрата; 6 — подвод электропитания

деионизация со смешанным слоем ионита) для доочистки. При удельном сопротивлении деионизованной воды более 15 МОм/см, ресурс MBDI-фильтра составляет более одного года, поэтому его не комплектуют блоком регенерации ионита, но, по истощении ионита, его заменяют на новый.

EDI-системы предназначены для получения ультрачистой воды с удельным сопротивлением более 16 МОм/см, при этом сопротивление исходной воды должно быть более 1 МОм/см — это требование сохраняется и для производства деионизованной воды с сопротивлением менее 16 МОм/см. Эксплуатация EDI-системы на нижнем пределе качества исходной воды приводит к слишком высокой зависимости качества деионизованной воды от эксплуатационных параметров. Качество исходной воды лимитируется следующими параметрами: массой суммы анионов (TEA — Total Exchangeable Anions), массой суммы катионов (TEC — Total Exchangeable Cations), жесткостью, содержанием В, SiO₂ и CO₂ (см. таблицу).

Учитывая довольно жесткие требования к качеству исходной воды, в процессе эксплуатации, помимо постоянного мониторинга ее сопротивления, необходимо проводить регулярный лабораторный контроль состава исходной воды с учетом сезонных колебаний. Анализ CO₂ может выполняться как непосредственным измерением, так и рассчитываться по концентрации HCO₃⁻ и величине pH. Содержание отдельных катионов и анионов производится с пересчетом их концентрации в мг/л CaCO₃.

Конверсия EDI-процесса (*R*) регулируется величиной потока, отводимого из циркуляционного контура (*Q_C*), и лимитируется концентрацией солей жесткости и кремния в С-каналах. Чем меньше *Q_C*, тем больше *R*, однако ее увеличение не должно превышать предела растворимости солей жесткости и кремния, чтобы не допустить их кристаллизации. Незначительные отложения солей жесткости можно удалить с помощью регенерационных промывок, загрязнения соединениями кремния удаляются очень трудно, поэтому лучше их

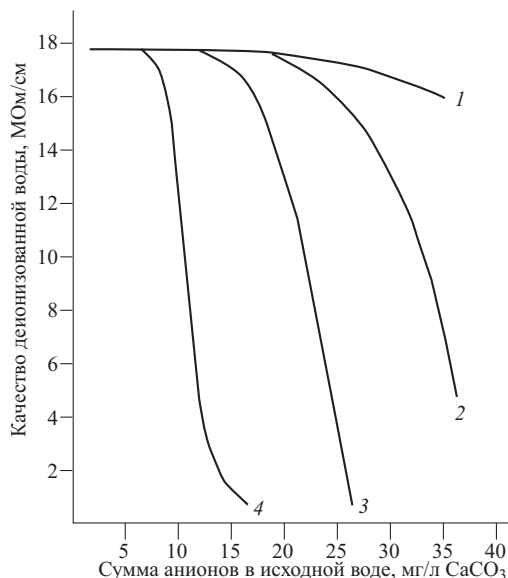


Рис. 4. Зависимость удельного сопротивления деионизованной воды от состава исходной воды и силы тока, Ампер: 1 — 4; 2 — 3; 3 — 2; 4 — 1.

не допускать. Не допускается наращивание конверсии с целью увеличения электропроводности в контуре концентрата. Величина конверсии определяется по следующей формуле:

$$R = \frac{(Q_{\text{исх}} + Q_C + Q_E)}{Q_{\text{исх}}} \times 100\%$$

где *Q_{исх}* — поток исходной воды.

Для исходной воды с жесткостью менее 1,0 мг/л CaCO₃ *R_{МАХ}* = 90 %.

Для исходной воды с жесткостью менее 0,1 мг/л CaCO₃ *R_{МАХ}* = 95 %.

При проектировании производительность EDI-установки рассчитывается исходя из номинальной производительности EDI-модулей. В процессе эксплуатации допускается кратковременное увеличение производительности относительно проектного номинала: на 30 % — в течение 2 ч, на 20 % — в течение 4 ч, на

Параметры исходной воды

Параметр	Ед. измерения	Предельно допустимая величина
TEA	мг/л CaCO ₃	25
TEC	мг/л CaCO ₃	25
ТОС	мг/л	0,5
SDI-индекс		1
Мутность	мг/л	0,05
Проводимость	мсм/см	65
pH		5 – 9
Жесткость	мг/л CaCO ₃	1,0
SiO ₂	мг/л	0,5
Fe, Mn, H ₂ S	мг/л	0,01
Маслянистые вещества	мг/л	Следы
Свободный хлор	мг/л	0,05
Другие окислители	мг/л	Следы

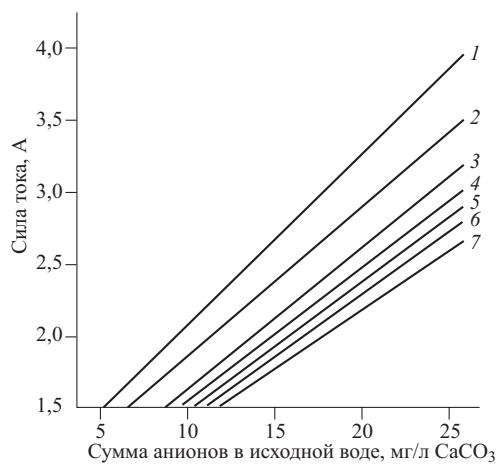


Рис. 5. Зависимость минимальной силы тока от величины ТЕА. Качество деионизованной воды, МОм/см: 1 – 17; 2 – 16; 3 – 14; 4 – 12; 5 – 10; 6 – 8; 7 – 6.

10 % — в течение 7 – 8 ч. Однако пиковые нагрузки не должны повторяться слишком часто. Поток исходной воды рассчитывается как сумма потоков деионизованной воды и рецикла концентрата при заданной конверсии. Отводимый из контура поток концентрата рассчитывается по формуле:

$$Q_C = Q_{исх} - Q_{у.ч.} - Q_E$$

или

$$Q_C = \left(\frac{100}{R} - 1 \right)_{исх} - Q_E.$$

Поток электролита из E-каналов является величиной постоянной и составляет примерно 20 л на 1 м³ ультрачистой воды.

Для поддержания минимального сопротивления в цепи между катодом и анодом проводимость в контуре концентрата должна быть достаточно высокой.

При низкой проводимости исходной воды (менее 5 Мсм/см), малой конверсии (до 95 %) и содержании CO₂ более 25 мг/л, как CaCO₃, в циркуляционный контур концентрата целесообразно инжестрировать раствор NaCl или другого сильного электролита, что значительно повышает селективность EDI-процесса по соединениям кремния и бора. Расчет дозирования электролита проводится относительно минимальной величины проводимости исходной воды.

Зависимость удельного сопротивления деионизованной воды от состава исходной воды и силы тока показана на рис. 4. При фиксированных значениях силы

тока увеличение солесодержания в исходной воде приводит к снижению удельного сопротивления деионизованной воды. На рис. 5 показана зависимость минимальной силы тока от величины ТЕА. Каждая кривая соответствует определенной величине удельного сопротивления деионизованной воды.

Мощность блока электропитания рассчитывается по графикам на рис. 5 по следующей методике.

1. Определить ТЕА в исходной воде, приняв за основу расчета наиболее низкое качество RO – пермеата в течение трех лет эксплуатации.

2. Выбрать соответствующую кривую на рис.5. При необходимости максимального удаления соединений кремния и бора, необходимо использовать кривую удельного сопротивления 17 МОм/см. Если требования по кремнию и бору не столь жесткие, то необходимо выбрать кривую, соответствующую заданному сопротивлению деионизованной воды. Если заданному сопротивлению не соответствует ни одна кривая, то к расчету принимается ближайшая — в сторону увеличения.

3. Используя ТЕА исходной воды и кривую, определенную по п. 1 и 2, на вертикальной оси считать минимальную величину силы тока, в которую заложен страховой фактор запаса. Максимальная сила тока на EDI-модуле не должна превышать 4,5 А.

4. Умножив определенную по п. 3 силу тока на количество EDI-модулей, получим величину тока, потребляемого EDI-установкой.

Мощность блока электропитания задается на 20 – 25 % больше суммарной величины потребляемого тока.

Для эффективного удаления соединений кремния, целесообразно использовать анионит с высокой степенью восстановления в процессе электрорегенерации. При этом сила тока должна соответствовать максимальному удельному сопротивлению деионизованной воды, независимо от его расчетной величины.

Образующиеся в процессе электролиза в E-каналах газы (водород, кислород и хлор) выносятся с потоком электролита в дренаж. На каждый ампер/мин образуется приблизительно 4 см³ смеси водорода и кислорода (в пересчете на сухой газ при 25 °С и 1 ат) в пропорции 2:1. Поэтому должны быть созданы необходимые условия для их вентиляции.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. И. Федоренко, *Хим.-фарм. журн.*, 37(3), 49 – 52 (2003).
2. *GLEGG reference design. Pure Water Systems*, GRD-2000, Ontario, Canada.

Поступила 17.12.02