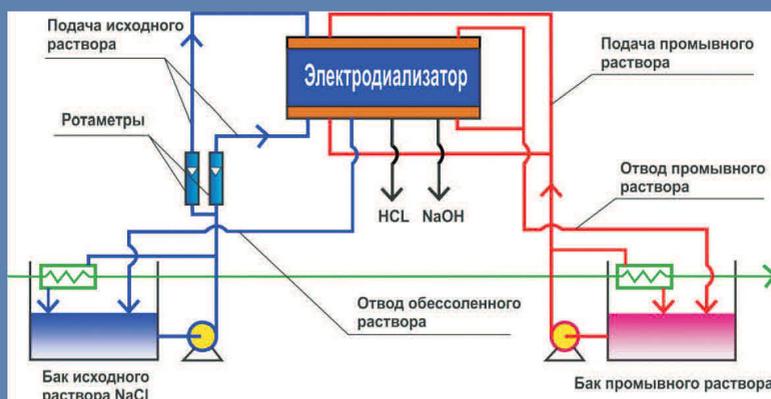


Министерство образования и науки
Российской Федерации

ФГБОУ ВПО «Московский государственный
строительный университет»

А.Г. Первов, В.А. Чухин, А.В. Михайлин

Расчет, проектирование и применение электродиализных (электроmemбранных) установок по деминерализации воды



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФГБОУ ВПО «МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

А.Г. Первов, В.А. Чухин, А.В. Михайлин

**РАСЧЕТ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ
И ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОДИАЛИЗНЫХ
(ЭЛЕКТРОМЕМБРАННЫХ) УСТАНОВОК
ПО ДЕМИНЕРАЛИЗАЦИИ ВОДЫ**

Рекомендовано Учебно-методическим объединением вузов РФ по образованию в области строительства в качестве учебного пособия для подготовки магистров, обучающихся по программе «Водоснабжение городов и промышленных предприятий и сооружений» направления 270800 «Строительство» (18.07.2012 г., № 102-15/724)

Москва 2012

УДК 628.165

ББК 38.761.1

П 26

Рецензенты:

профессор, доктор технических наук *О.Г. Примин*,
заместитель генерального директора
по научным исследованиям ОАО «МосводоканалНИИпроект»;
кандидат технических наук *Л.А. Квитка*, доцент кафедры
сельскохозяйственного водоснабжения
Московского государственного университета природообустройства;
доктор технических наук *Л.С. Алексеев*, профессор кафедры
гидравлики и водохозяйственных сооружений
Российского государственного аграрного заочного университета

Первов, А.Г.

П 26 Расчет, проектирование и применение электродиализных (электро-мембранных) установок по деминерализации воды : учебное пособие / А.Г. Первов, В.А. Чухин, А.В. Михайлин ; М-во образования и науки Росс. Федерации, ФГБОУ ВПО «Моск. гос. строит. ун-т». — Москва : МГСУ, 2012. — 87 с.

ISBN 978-5-7264-0669-5

Приведены рекомендации по использованию электродиализных и электромембранных аппаратов и технологических схем на их основе для опреснения и обессоливания воды. Дан анализ областей применения электродиализа. Описаны свойства ионообменных мембран. Приведены конструктивные особенности электродиализных аппаратов и их комплектующих: электродов, прокладок, сепараторов-турбулизаторов. Дана методика расчета электродиализаторов для опреснения воды с различным солесодержанием. Приведены примеры расчета электродиализных аппаратов.

Для студентов строительных учебных заведений, а также специалистов по водоподготовке.

УДК 628.165

ББК 38.761.1

ISBN 978-5-7264-0669-5

© ФГБОУ ВПО «МГСУ», 2012

О Г Л А В Л Е Н И Е

Предисловие.....	3
Условные обозначения	4
1. Общие положения. Схемы электродиализных опреснительных установок.....	7
1.1. Общие положения	7
1.2. Схемы электродиализных опреснительных установок	7
2. Устройство электродиализных аппаратов	11
2.1. Общая характеристика электродиализных аппаратов	11
2.2. Конструктивные элементы электродиализного аппарата	15
3. Расчет электродиализных опреснительных установок	24
3.1. Теоретические основы процесса электродиализа	24
3.2. Определение основных рабочих характеристик электродиализного аппарата	29
3.2.1. Определение оптимальной кратности концентрирования рассола	29
3.2.2. Определение количества рабочих ячеек.....	31
3.2.3. Определение оптимальной плотности тока	31
3.2.4. Влияние концентрационной поляризации на процесс электродиализа.....	35
3.2.5. Гидравлические характеристики электродиализных аппаратов	38
3.2.6. Предотвращение осадкообразования при электродиализном опреснении.....	39
4. Пример технологического расчета электродиализной циркуляционной установки.....	42
5. Пример технологического расчета электродиализной прямоточной установки	50

6. Свойства ионообменных мембран и влияние на них концентрационной поляризации.....	63
6.1. Селективность ионитовых мембран.....	63
6.2. Технологические схемы подготовки воды для электродиализных установок и мероприятия по предотвращению осадкообразования	67
6.3. Причины возникновения концентрационной поляризации мембран.....	68
7. Примеры использования электромембранных методов в технологии водоподготовки	71
7.1. Электродиализ растворов солей в аппаратах с биполярными мембранами	71
7.2. Сущность процесса электродеионизации	72
7.3. Процесс предельного концентрирования растворов солей.....	76
Библиографический список.....	80
Приложение 1. Характеристика электродиализного аппарата ЭХО-5000-200	81
Приложение 2. Характеристика электродиализного аппарата ЭХО-2000-200	83

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

C — концентрация, мг-экв/л, г-экв/м³;

$C_n, C_{исх}$ — концентрация исходной воды, равная концентрации в начале цикла опреснения, мг-экв/л, г-экв/м³;

C_k — концентрация опресненной воды, равная концентрации в конце цикла опреснения, мг-экв/л, г-экв/м³;

$C_{вх}, C_{вых}$ — концентрация диализата на входе и выходе в аппарате любой ступени, мг-экв/л, г-экв/м³;

$C_{вх}^p, C_{вых}^p$ — концентрация рассола на входе и выходе в аппарате любой ступени, мг-экв/л, г-экв/м³;

C_d, C_p — расчетные концентрации диализата и рассола на входе и выходе в аппарат, мг-экв/л, г-экв/м³;

ΔC — снижение концентрации на аппарате (установке), мг-экв/л, г-экв/м³;

F — число Фарадея; $F = 26,8$ А-ч/г-экв;

Q — производительность установки, м³/ч;

q — циркуляционный расход, л/с;

i — плотность тока, А/см²;

$i_1, i_2, i_3 \dots i_z$ — расчетные плотности тока на аппаратах 1-й, 2-й, 3-й и z-й ступеней, А/см²;

i_p — расчетная плотность тока на аппарате циркуляционной установки, А/см²;

i_n, i_p, i_k — плотности тока на аппарате циркуляционной установки в начале, середине и конце цикла опреснения, А/см²;

i^{opt} — оптимальная плотность тока, А/см²;

η — коэффициент выхода по току, безразмерный;

$F_{бр}$ — площадь мембран, брутто, см²;

F_n — площадь мембран, нетто, см²;

η_F — коэффициент использования площади мембран, безразмерный;

b — расчетная ширина камеры в направлении, перпендикулярном оси потока, см;

l — расчетная длина пути потока в камере, см;
 d — толщина корпусной рамки, равная расстоянию между мембранами, см;
 n — количество рабочих ячеек (пар мембран + пар корпусных рамок) в аппарате, шт.;
 N — количество параллельных аппаратов в циркуляционной установке или каждой ступени прямоточной установки, шт.;
 I — сила тока на аппарате, А;
 U — напряжение на электродах аппарата, В;
 E_3 — падение напряжения на электродной системе (электродный потенциал), В;
 E_m — мембранный потенциал ячейки с учетом концентрационной поляризации, В;
 r_y — сопротивление ячейки, Ом;
 δ — коэффициент увеличения сопротивления камер сепараторами, безразмерный;
 ρ — поверхностное сопротивление мембран (среднее), Ом·см²;
 φ — удельная электропроводность раствора, Ом⁻¹·см⁻¹;
 φ_t, φ_{18} — удельная электропроводность раствора при температуре t и 18°С, См·см⁻¹, Ом⁻¹·см⁻¹;
 φ_d, φ_p — расчетные удельные электропроводности диализата и рассола, Ом⁻¹·см⁻¹;
 z — число ступеней опреснения прямоточной установки, шт.;
 K_c — коэффициент концентрирования рассола, безразмерный;
 k' — коэффициент, характеризующий деполяризационные свойства сепаратора-турбулизатора, (см³/А·с)·(мг-экв/л);
 $v_{кр}, v_{ф}$ — скорости потока диализата в камере, в отношении к ее свободному объему, критическая и фактическая, см/с;
 $\alpha_{кр}$ — предельный коэффициент снижения концентрации диализата на каждой ступени, безразмерный;
 α — фактический коэффициент снижения концентрации диализата на каждой ступени, безразмерный;
 β, θ — эмпирические коэффициенты из формулы (3) для определения удельной электропроводности растворов;

h_k — потеря напора в камере электродиализного аппарата, м вод. ст.;

$h_{p,cb}$ — потери напора в распределительной или сборной системах аппарата, м вод.ст.;

$v_{p,cb}$ — скорость в начале распределительного или конце сборного коллектора аппарата, м/с;

$\xi_{p,cb}$ — коэффициенты сопротивления распределительной или сборной систем аппарата, безразмерные;

$\eta_{пр}$ — КПД преобразователя тока, безразмерный;

$\eta_{агр}$ — КПД насосного агрегата, безразмерный;

K_{ω} — отношение суммы площадей отверстий к площади сечения распределителя или сборника;

Υ, γ — коэффициенты, характеризующие потери напора в камерах электродиализных аппаратов;

M — коэффициент, характеризующий потери напора в аппаратах и трактах диализата и рассола (только для определения i^{opt} прямоточных установок):

= 1,6 для камер прокладочного типа;

= 1,2 для камер лабиринтного типа;

A — промежуточный коэффициент,

$$A = \frac{1 - \alpha}{\ln \frac{1}{\alpha}}, \text{ безразмерный;}$$

B — коэффициент, зависящий от расчетного срока службы мембран:

= 3,05 при сроке службы 2 года;

= 2,04 при сроке службы 3 года;

Π_{ϵ} — цена электроэнергии, к./кВт-ч;

Π_M — цена мембран (средняя), р./м².

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ. СХЕМЫ ЭЛЕКТРОДИАЛИЗНЫХ ОПРЕСНИТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК

1.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Одним из промышленных методов опреснения воды является электрохимический метод — метод электродиализа, применение которого экономично при опреснении вод с солесодержанием 2–15 г/л.

Исходная вода, подаваемая на опреснительную установку, должна отвечать следующим требованиям [1]:

- взвешенных веществ не более 2 мг/л; цветность не выше 20 град по платино-кобальтовой шкале;
- количество органических веществ должно быть ограничено — окисляемость исходной воды не должна превышать 5 мг/л O_2 ;
- железа (общего) не более 0,05 мг/л;
- марганца не более 0,05 мг/л.

В случаях, когда качество исходной соленой воды выходит за эти пределы, необходима подготовка воды по одной из известных схем осветления, обесцвечивания, обезжелезивания или обезмарганцовывания.

Для доведения бактериологических и органолептических показателей опресненной воды до норм, обусловленных СанПиН 2.1.4.1074-01 “Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества”, вода после опреснения может быть подвергнута дезинфекции и дезодорации по одной из известных схем.

1.2. СХЕМЫ ЭЛЕКТРОДИАЛИЗНЫХ ОПРЕСНИТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК

Процесс опреснения методом электродиализа может быть осуществлен по одной из рассматриваемых схем (рис. 1):

- прямоточная (см. рис. 1,а) — диализат и рассол проходят параллельными потоками через несколько последовательно установленных аппаратов (ступеней). Эта схема, как правило, применяется при коэффициенте концентрирования рассола K_c (см. разд. 3), близком к 2, когда расходы диализата и рассола равны. При иных значениях применение этой схемы осложнено необходимостью дросселирования одного из трактов на каждой ступени и появлением вследствие этого перепадов давления на мембранах в аппаратах;

- прямоточная с рециркуляцией рассола (см. рис. 1,б) — диализат и рассол проходят параллельными потоками через несколько последовательно установленных аппаратов (ступеней) с равными расходами. Для поддержания оптимальной концентрации рассола с любым значением $K_c > 2$ осуществляется его рециркуляция. При невысоких концентрациях солей в исходной воде продувка рассольного тракта ведется обычно после последней ступени, при высоких же концентрациях продувку целесообразно осуществлять после аппаратов первых ступеней. Расход продувки во всех случаях зависит от величины K_c . Эта схема рекомендуется для крупных опреснительных установок. В каждой из ступеней опреснения может быть установлено по несколько параллельных аппаратов;

- порционная с циркуляцией (см. рис. 1,в) – диализат и рассол прокачиваются циркуляционными насосами через один или несколько параллельно установленных аппаратов с возвратом в циркуляционные емкости до тех пор, пока солесодержание диализата не понизится до заданной величины. Затем опресненная вода выдается потребителю, а циркуляционный насос диализата переключается на вторую емкость, предварительно заполненную исходной водой. Концентрация рассола в циркуляционной емкости определяется величиной K_c и поддерживается постоянной за счет непрерывной его продувки и восполнения убыли в емкости рассола исходной водой;

- циркуляционная непрерывного действия (см. рис. 1,г) — эта схема в основном аналогична предыдущей, однако в ней отсутствуют циркуляционные емкости, а исходная вода подается непосредственно во всасывающие линии циркуляционных насосов диализата и рассола. В тракте диализата исходная вода разбавляется частью опресненной воды, вытесняя оставшуюся часть потребителю, а в тракте рассола исходная вода разбавляет циркулирующий рассол до концентрации, определяемой величиной K_c , и вытесняет концентрированный рассол.

В электродиализных опреснительных установках электроэнергия расходуется как на ведение самого процесса опреснения, так и на привод насосов для прокачки или циркуляции диализата и рассола. Расход энергии на опреснение в циркуляционных и прямоточных установках примерно одинаков, однако расход энергии на циркуляцию в первых больше, при этом он зависит от солесодержания исходной воды, снижаясь с его уменьшением. Поэтому выбор прямоточной или циркуляционной схемы опреснения должен осуществляться путем экономического сравнения.

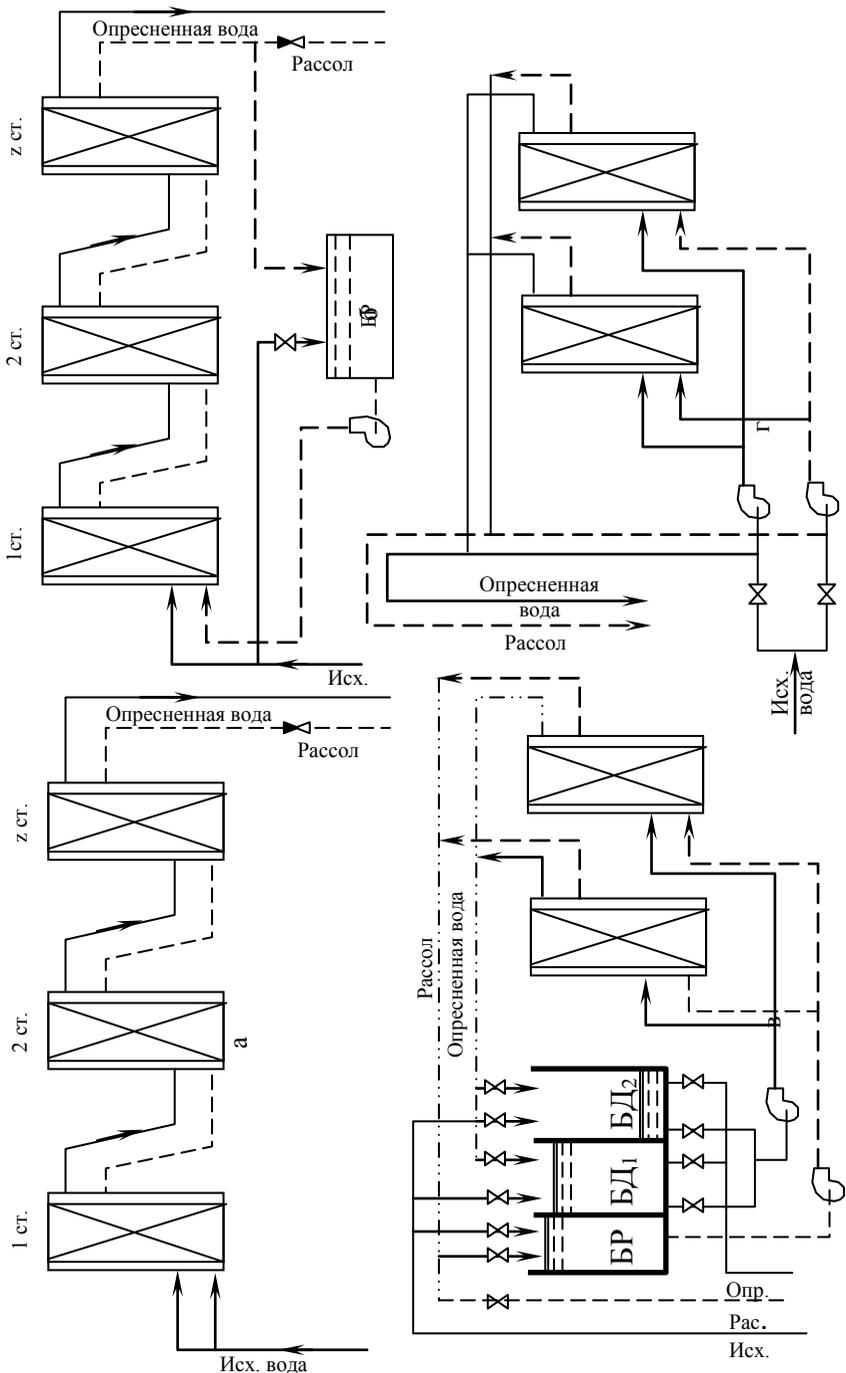


Рис. 1. Схемы электродеализных опреснительных установок: а — прямоточная; б — циркуляционная с рециркуляцией рассола; в — порционная с циркуляцией; г — циркуляционная непрерывного действия с рециркуляцией рассола.