

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РФ  
ФГБОУ ВПО «САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

---

**М.М. БЕЗЗУБЦЕВА**

**ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ  
И ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ  
УСТАНОВКИ В АПК**

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

2012

УДК 621.311(07)  
ББК 40.76

Составитель: М.М. Беззубцева

Рецензенты: д.т.н., проф. С.А. Ракутько; д.т.н., проф. В.В. Орлов

М.М. Беззубцева

А 24: Электротехнологии и электротехнологические установки в АПК.  
– СПб: СПбГАУ, 2012. - с.

В учебном пособии рассмотрены современные электрообъемные, высоковольтные и лазерные электротехнологии и установки агропромышленного комплекса.

Учебное пособие составлено в соответствии с рабочими программами дисциплины «Электротехнологии и электротехнологические установки в АПК» и предназначено для подготовки магистров по направлению 110800.68 «Агроинженерия». Учебное пособие также может быть использовано студентами, аспирантами и научными работниками, работающими в различных областях АПК.

УДК 621.311(07)  
ББК 40.76

ISBN 978-5-85983-063-3

© М.М. Беззубцева

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Задача электротехнологии как науки – исследование и выявление физических, химических, механических и иных закономерностей с целью определения и использования на практике наиболее эффективных и экономичных производственных процессов.

В условиях рыночной экономики и научно-технического прогресса роль новых электротехнологий трудно переоценить. Современная история экономического развития общества – это история разработки и внедрения новых технологий, в том числе и технологий с использованием электрического тока в различных формах его проявления.

Внедрение в производственные процессы агропромышленного комплекса новых электротехнологий позволяет:

во-первых, создавать принципиально новые продукты, услуги, материалы и электротехнологическое оборудование;

во-вторых, получать уже известные товары нового качества (например, кевлара по своим прочностным характеристикам во много раз превосходящего ранее известные материалы);

в-третьих, снизить себестоимость производства уже известных продуктов;

и, наконец, самое важное, – повысить энергоэффективность всего производства и снизить энергоемкость продукции.

Цель учебного пособия можно сформулировать следующим образом:

Познакомить будущих магистров–агроинженеров с современными электромембранными технологиями; с возможностями новых

электротехнологических процессов, основанных на использовании прямого воздействия на материал сильных электрических и магнитных полей, применении плазмы газового разряда для плазмохимических преобразований газовой среды и материалов, электроимпульсных методов воздействия на материал. Заложить основы знаний по физике лазерных технологий.

На основе конкретных примеров показать энергетическую, эргономическую и экологическую эффективность новых электротехнологических процессов по сравнению с традиционными.

В связи с тем, что содержание курса базируется на новых разработках, которые отражены только в монографиях и статьях в научно-технических журналах, то до сих пор отсутствует учебник или учебное пособие, которое можно было бы рекомендовать магистрам, обучающимся по специальности «Агроинженерия».

Текст учебного пособия состоит из 6 глав.

В компактной форме изложены сведения об электромембранных технологиях. Представлены теоретические основы технологий, базирующихся на использовании сильных электрических полей, дано описание конкретных технологий этого типа. Представлены физические основы плазмохимических технологий, основанных на импульсном воздействии на материалы (электрогидравлическая, электроэрозсионная и магнитно-импульсная), а также конструкции и области применения электрогазодинамических устройств. Приведены основополагающие сведения о технологических лазерных установках.

Учебное пособие предназначено для магистров энергетического факультета, а также может быть использовано студентами, аспирантами, научными сотрудниками и инженерами, работающими в различных областях АПК.

## Глава 1. МЕМБРАННЫЕ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ

"Электромембранная технология" – наука о технологиях мембранного разделения, концентрирования и очистки жидких и газовых систем с использованием электрического тока. В последние годы электромембранная технология получила широкое распространение в аппаратно-технологических системах предприятий агропромышленного комплекса.

Мембраны – это селективно-проницаемый барьер между двумя фазами. Их изготавливают из органических (в том числе полимерных) и неорганических (металлических, керамических, стеклянных и пр.) материалов. Мембраны могут быть твердые и жидкие. Для производства мембран необходима современная высокоточная технология, которая принципиально отлична для органических и неорганических мембран. Мембранное разделение основано на селективном переносе компонентов смеси через мембрану. Использование мембранных процессов для разделения смесей позволяет создать экономически эффективные, ресурсо – и энергосберегающие малоотходные технологии. Можно выделить следующие основные области применения и направления развития мембранной техники и мембранных технологических процессов:

### *Топливо-энергетический комплекс:*

- очистка и осушка попутного нефтяного газа;
- разделение компонентов нефтехимических производств;
- разделение биогаза.

### *Водоподготовка:*

- получение питьевой воды путем опреснения морских вод;
- повышение качества питьевой воды;
- получение особо чистой воды; обеззараживание и стерилизация воды;
- очистка сточных вод производственных предприятий АПК и бытовых сточных вод.

### *Перерабатывающая промышленность:*

- получение очищенной воды для технологических процессов; концентрирование соков;
- очистка вина, пива; переработка молочных продуктов;
- создание инертных сред для длительного хранения овощей и фруктов и переработки сырья и полуфабрикатов;
- получение сока из плодовоовощной продукции.

### *Биотехнология:*

- стерилизация технологических сред; извлечение целевых компонентов (ферментов, витаминов и пр.);
- концентрирование продуктов биотехнологических процессов; организация непрерывных биотехнологических процессов, в которых происходит непрерывное извлечение целевых компонентов из биореактора (мембранный реактор).

### *Ветеринария:*

- получение очищенной, стерильной, апиrogenной воды для приготовления вакцин, медицинских препаратов, промывки ампул;
- очистка крови методом диализа, выделение, очистка и концентрирование лекарственных препаратов в процессах получения лекарственных средств;
- физиотерапия (аппарат "Горный воздух").

Это лишь краткий перечень областей применения мембранной технологии. В любом процессе, где требуется извлечь целевой компонент, провести концентрирование, разделение, очистку газовых и жидких сред, провести процессы в инертных средах может применяться мембранная технология. И практически во всех случаях она будет конкурентноспособна и более выгодна по сравнению с традиционными методами очистки, разделения и концентрирования. Рынок мембран ежегодно увеличивается на 15-20%.

Электромембранная технология – одна из самых динамично развивающихся отраслей промышленности.

Современные электромембранные процессы отличаются высокой селективностью, низкими энергозатратами, простотой аппаратного оформления, служат основой создания энергосберегающих, экологически чистых и безотходных технологий.

### **1.1.ОСНОВЫ ТЕОРИИ ЭЛЕКТРОКИНЕТИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОКАПИЛЛЯРНЫХ ЯВЛЕНИЙ В ПРОЦЕССАХ ЭЛЕКТРОМЕМБРАННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

Электрокинетические явления лежат в основе электромембранных процессов и технологий. Электрокинетические явления отражают связь между относительным движением двух фаз (твердой и жидкой) и электрическими свойствами границ их раздела (мембраны).

Основные электрокинетические явления: электроосмос, электрофорез, потенциал течения и потенциал осаждения.

Электроосмос – движение жидкости через капилляр или пористое тело под действием внешнего электрического поля.

Электрофорез – движение твердых частиц, диспергированных в жидкости под действием внешнего электрического поля.

Потенциал течения – это наличие разности потенциалов между точками, расположенными на некотором расстоянии друг от друга, по направлению течения жидкости через пористое тело или капилляр.

Потенциал осаждения (седиментации) – разность потенциалов в точках на разных уровнях трубы при осаждении твердых частиц жидкости. Открытие этих явлений относится к началу 19 века.

Электрокинетические явления могут широко использоваться при обезвоживании сельскохозяйственного сырья, пропитке разнообразных материалов, выделении сока из трав и плодов, разделении сложных составов и т.д.

Существование электрокинетических явлений обусловлено наличием двойного электрического слоя на границе раздела твердой и жидкой фазы.

В растворах величина тока обусловлена перемещением как отрицательно заряженных частиц, так и положительных, т.е. существует электронно-ионная проводимость, а в металлах – только электронная. Так как масса иона в тысячи раз больше массы электрона, то появляется возможность через посредство электрических сил воздействовать на массоперенос. Между направлением и скоростью электрофореза и электроосмоса, с одной стороны, и направлением и напряженностью приложенного электрического поля – с другой, существует связь, позволяющая определить знак и величину заряда твердых частиц относительно жидкости и соответствующий скачок потенциала.

Скорость электроосмоса  $V$  и потенциал течения  $E$  связаны зависимостями:

$$V = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon}{\eta} \cdot \frac{\Delta\psi}{\Delta x} \xi, \quad E = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 P}{\eta \gamma_0}, \quad (1.1)$$

или

$$E = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 P}{\eta} S \frac{\Delta\psi}{\Delta x} \xi, \quad (1.2)$$

где  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость жидкой фазы;  $\Delta\psi/\Delta x$  – напряжённость электрического поля в направлении, параллельном границе раздела фаз;  $\eta$  – вязкость жидкой фазы;  $\gamma_0$  – электропроводность;  $P$  – давление, вызывающее перемещение жидкости;  $S$  – сечение взвешенной частицы или поры.

Величина  $\xi$  называется электрокинетическим потенциалом или дзета-потенциалом. Рассчитанная по формуле величина  $\xi$  может значительно отличаться от истинной. Напряженность поля, удельная электропроводность, диэлектрическая постоянная и вязкость жидкой фазы на границе раздела фаз могут значительно отличаться от соответствующих значений в глубине жидкой фазы.

Теорию строения двойного электрического слоя предложил Гельмгольц, который уподобил двойной электрический слой заряженному плоскому конденсатору, одна из обкладок которого совпадает с плоскостью, проходящей через центры тяжести зарядов на поверхности твердого тела (электрода),

другая – с плоскостью, соединяющей центры тяжести зарядов ионов, находящихся в растворе (притянутых электростатическими силами к поверхности твердого тела).

Толщина двойного слоя  $l$  принималась равной радиусу ионов  $r_{и}$ . Двойной электрический слой электронейтрален, т.е. число ионов на поверхности твердой фазы равно числу ионов в жидкости у поверхности раздела:

$$q_1 = -q_n \tag{1.3}$$

Ёмкость двойного слоя:

$$C = \frac{\epsilon\epsilon_0}{l}, \tag{1.4}$$

где  $l$  – толщина двойного слоя ( $3 \cdot 10^{-10}$  м).

Строение двойного электрического слоя по Гельмольцу представлено на рис.1.1 (а, б).

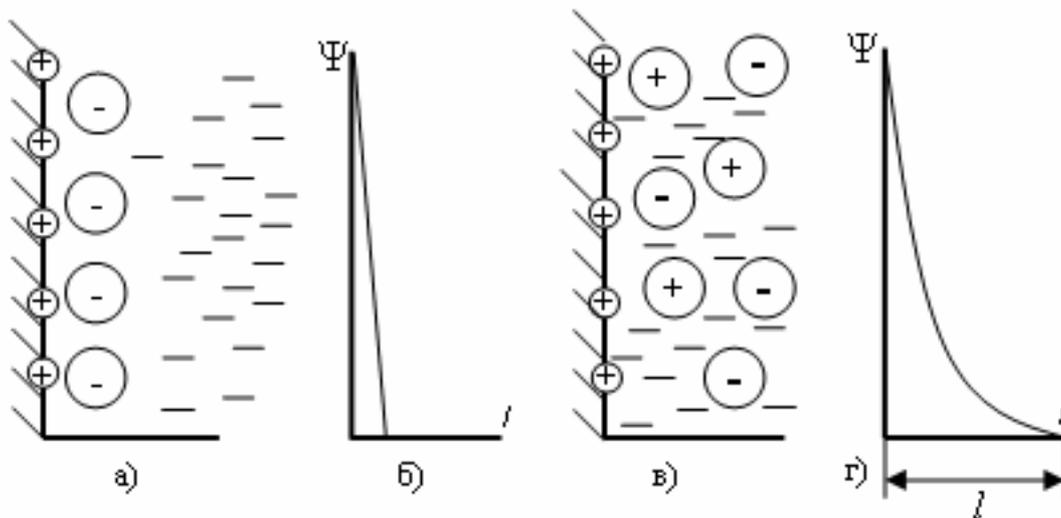


Рис. 1.1. Строение двойного слоя: а) по Гельмгольцу; б) по Дебаю-Гюккелю; в) распределение потенциала на границе раздела фаз

Теория Гельмгольца дает правильные значения емкости и толщины двойного слоя, но не может объяснить целый ряд опытных закономерностей и может быть использована как первое приближение к действительности.

Теории двойного слоя Гуи-Чапмана и в дальнейшем Дебая-Гюккеля предполагают диффузное распределение ионов у границы раздела сред (рис. 1.1, в, г). Взаимодействие электрических и термодинамических сил распределяет ионы в жидкости по убывающей при удалении от границы

раздела.

Заряд слоя жидкости, компенсирующий заряд твердого тела, определяется по выражению:

$$q_{ж} = (8\varepsilon\varepsilon_0 RTC)^{1/2} \cdot sh\left(\frac{Fq_{ТЖ}}{2RT}\right) \quad (1.5)$$

Ёмкость двойного слоя:

$$C = \frac{F}{(RT)^{1/2}} (2\varepsilon\varepsilon_0 C)^{1/2} ch\left(-\frac{E\Psi}{RT}\right) \quad (1.6)$$

Рассчитанная по этой формуле ёмкость оказывается в несколько раз больше экспериментальных значений. Это объясняется тем, что в теории Гуи-Чепмена не учитываются собственные объемы ионов, т.е. ничто не мешает зарядам располагаться на сколь угодно близком расстоянии от твердой поверхности. Хотя теория Гуи-Чепмена лучше объясняет электрокинетические явления, но оказывается неудовлетворительной при количественных расчетах.

Дальнейшие попытки создать, теорию двойного электрического слоя заключались в объединении теории Гельмгольца и Гуи-Чепмена. Так, Грэм предположил, что двойной электрический слой состоит из трех частей. Первая от твердой поверхности называется внутренней поверхностью Гельмгольца, в ней находятся только поверхностно - активные ионы. Следующая плоскость называется внешней плоскостью Гельмгольца, и расстояние до нее определяется способностью некоторых ионов приближаться к поверхности раздела под действием теплового движения.

За внешней поверхностью Гельмгольца располагается диффузный слой.

Использование той или иной теории определяется задачами, требуемой степенью точности и конкретными условиями расчета.

Существование двойного электрического слоя раскрывает суть электрокинетических явлений.

*Краткая характеристика явления электрофореза.* Поверхность частиц твердого вещества, взвешенных в жидкости, приобретает электрический заряд

определенной полярности. Частицы имеют возможность перемещаться в жидкости, и, следовательно, при наложении внешнего поля частица будет перемещаться к электроду, имеющему противоположный заряд.

В биологических системах и сбросных водах большинство коллоидов имеют отрицательный заряд. Одним из решений удаления или концентрирования коллоидов является конструкция (рис. 1.2), состоящая из двух катионообменных мембран и одной нейтральной (фильтра).

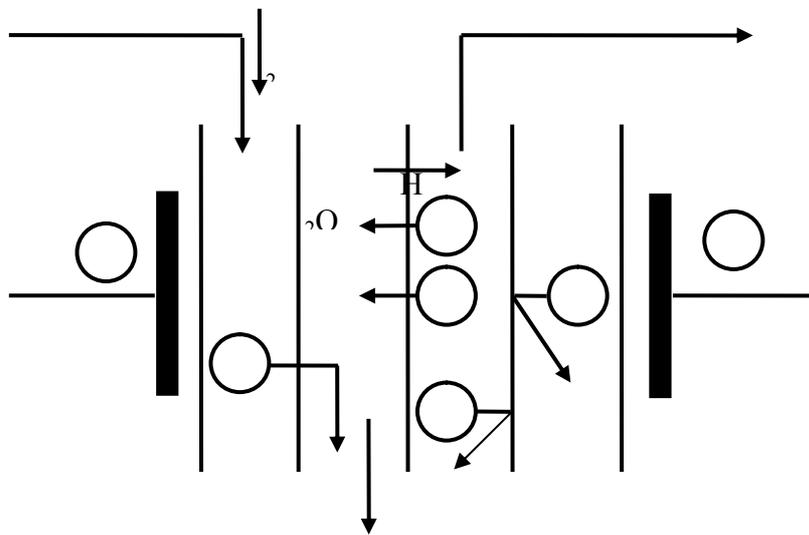


Рис. 1.2. Схема ячейки электрофореза

Через нейтральный фильтр свободно проходит вода и небольшие ионы. Через катионообменную мембрану под действием электрического тока проходят небольшие ионы и, очень трудно, вода. Поэтому, при создании давления с одной стороны фильтра (нейтральная мембрана) вода проходит через нее, а катионы не проходят из-за действия электрического поля. Таким образом, внешний электрический потенциал заставляет соль оставаться в секции исходного раствора, а внешнее давление выдавливает воду через нейтральный фильтр. Мембранный процесс осуществляется под действием электрического поля и давления. Главное преимущество – малые затраты энергии.

*Краткая характеристика явления электроосмоса.* В капилляре,

заполненном жидкостью, ионы, находящиеся у границы раздела сред, перемещаются под действием внешнего электрического поля (рис. 1.3.) и создают перепад давлений.

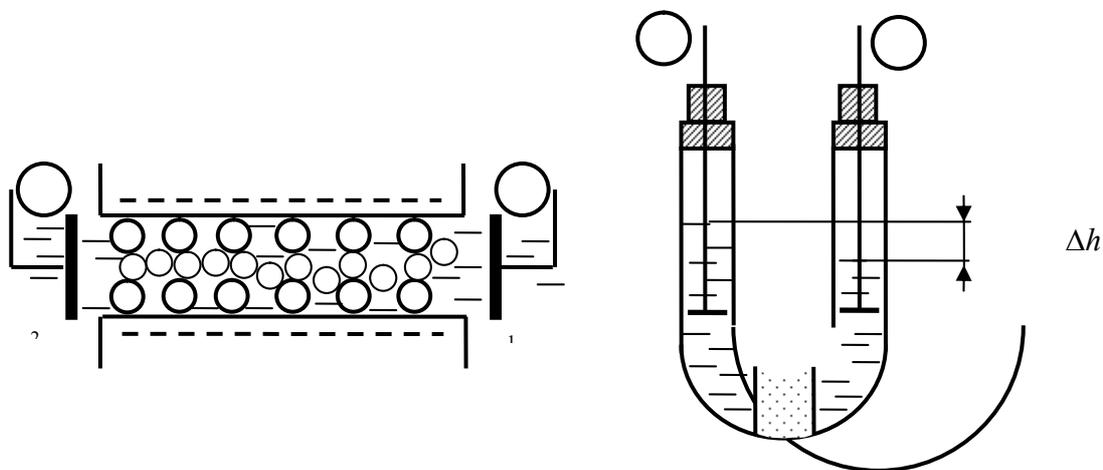


Рис. 1.3. Явление электрофореза: а) в капилляре; б) в пористой мембране

Если жидкостью заполнено пористое тело, вместо капилляра следует рассматривать его поры, а само тело – своеобразной мембраной. Разность уровней  $\Delta h$  определяется перепадом давлений  $\Delta P = P_2 - P_1$ . Пористое тело с капиллярами малой длины носит название мембраны. Естественные мембраны присущи всем живым организмам. Это мембраны органоидов растительной клетки и сама оболочка клетки. В некоторых случаях в качестве мембраны можно рассматривать стенку стебля и эпидермис листа. Отличительной особенностью электроосмоса является перенос через поры мембраны растворителя под действием электрического поля. Скорость потока растворителя через единицу поверхности мембраны определяется выражением:

$$\frac{V}{S \cdot t} = \frac{\varepsilon \cdot z \cdot I}{4\pi\mu\lambda} \quad (1.7)$$

где  $S$  – площадь мембраны;  $V$  – объёмный поток;  $t$  – время;  $\varepsilon^*$  – диэлектрическая постоянная;  $I$  – ток;  $\mu$  – вязкость;  $\lambda$  – удельная теплопроводность

*Краткая характеристика явления электродиализа.* Это процесс, в котором ионы растворенного вещества проходят через мембраны под действием

электрического поля. Электродиализ отличается от электроосмоса переносимым компонентом. В электроосмосе переносится растворитель, в электродиализе – растворенное вещество. При использовании электрического градиента оба процесса могут протекать одновременно. В электродиализе направление переноса может быть любым в зависимости от соотношения концентрации растворов по обе стороны мембраны и направленности электрического поля.

Перенос ионов выражается суммой двух скоростей потоков, обусловленных градиентом концентрации растворов и градиентом электрического потенциала:

$$\frac{V}{S \cdot t} = \frac{b_1 \Delta E}{R'} + \frac{b_2 D \Delta C}{l}, \quad (1.8)$$

где  $b_1$  и  $b_2$  – коэффициенты пропорциональности;  $\Delta E$  – разность потенциалов;  $R'$  – электрическое сопротивление ячейки;  $D$  – коэффициент диффузии;  $\Delta C$  – разность концентрации;  $l$  – толщина мембраны;  $V$  – объёмный поток;  $S$  – площадь мембраны;  $t$  – время.

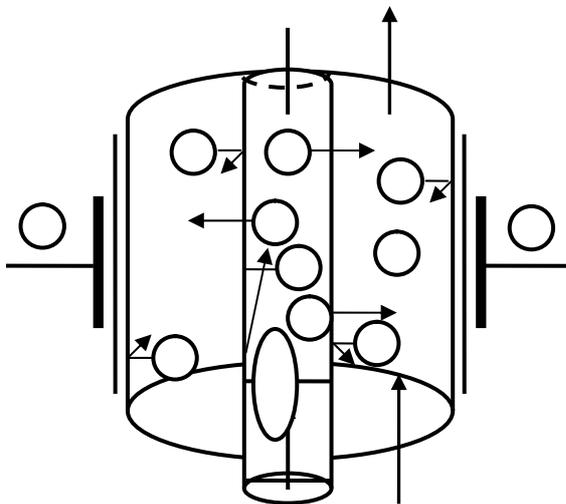


Рис. 1.4.Схема электродиализа

При значительной напряженности внешнего электрического поля катионы из исходного вещества переносятся в поток концентрата через катионообменную мембрану, находящуюся со стороны катода. Анионы

движутся в противоположном направлении и переносятся в поток концентрата через анионообменную мембрану. Катионы в потоке концентрата задерживаются анионообменной мембраной со стороны катода, а анионы – катионообменной мембраной со стороны анода. Установки электродиализа эффективно используются при опреснении солёной воды и еще более эффективны при опреснении солоноватых вод.

Подобные установки широко используются при деминерализации продуктов и напитков, которые весьма чувствительны к теплу и высокому давлению.

Разновидностью электродиализа является процесс электросорбции. В установке электросорбции исходный раствор обтекает ячейки, одна сторона которых является катионообменной, а другая – анионообменной мембраной. Набор мембран помещается между электродами. Анионы с одной стороны и катионы – с другой переносятся в ячейку, и раствор внутри его концентрируется. Сконцентрированный раствор можно удалить, сменив полярность электродов, что значительно упрощает конструкцию установки.

## **1.2. ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ ЭЛЕКТРОМЕМБРАННЫХ ПРОЦЕССОВ**

Электромембранные процессы (ЭМП) принадлежат к процессам жидкофазного разделения. За счет собственных межйонных взаимодействий может возникать движущая сила ионного разделения, намного превышающая ту же величину, обусловленную одним только концентрационным градиентом. Поэтому возможно перекачивание ионов из разбавленного раствора в раствор с повышенной концентрацией. Однако такое разделение всегда ограничивается принципом Доннановского равновесия, причем выделение ионов, превышающее равновесную концентрацию, невозможно. Более того, возникающий ионный поток обычно слишком мал для его промышленного использования. Эти ограничения можно преодолеть под действием внешнего электрического потенциала. Процессы в электромембранных аппаратах обусловлены градиентом электрического потенциала по толщине мембран. Применяя достаточный набор мембран и соответствующий высокий

электрический потенциал, можно удалить из раствора даже следы ионов, концентрации которых лежат вне Доннановского равновесия. Ионный поток в этом случае обусловлен главным образом электрическим переносом. Поэтому под действием электрического тока через мембрану можно достичь, в определенных пределах, довольно высоких потоков. Следовательно, толщина мембраны в этом случае не так существенна, как при проведении других процессов.

Мембраны в ЭМП изготавливают из полимерных или неорганических материалов [поры размером  $(2 - 8) \cdot 10^{-3}$  мкм], проницаемых для любых ионов. Эти мембраны служат для отделения неэлектролитов. Другой тип мембран, селективных только для катионов или только для анионов, изготавливают из ионообменных смол электролитов.

Мембраны подразделяются по знаку заряда матрицы на катионитные и анионитные (рис.1.5), а по способу получения на гетерогенные и гомогенные.

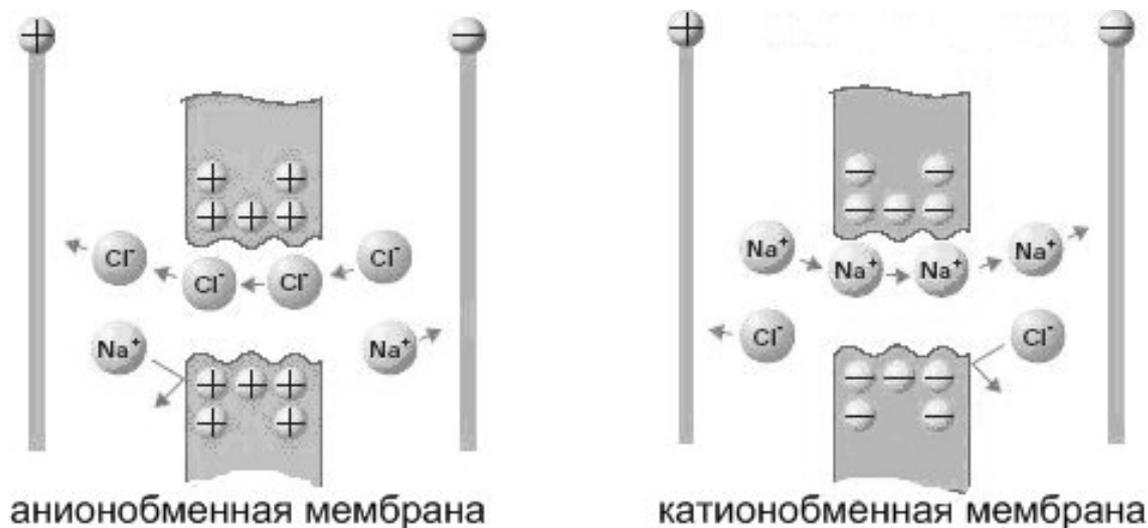


Рис. 1.5. Анионообменная и катионообменная мембрана

Катионообменные мембраны пропускают только катионы, а анионообменные – только анионы. Анионообменные мембраны содержат катионные группы, фиксированные в матрице смолы, из которой формируется мембрана. Заряд фиксированных катионов нейтрализуется зарядом подвижных

анионов, находящихся в порах смолы. При погружении такой мембраны в раствор электролита анионы раствора могут внедряться в матрицу смолы и замещать первоначально присутствующие в ней анионы, в то время как проникновению катионов препятствуют силы отталкивания их фиксированными в смоле катионами. Аналогично действуют и катионообменные мембраны.

Гетерогенные мембраны представляют собой тонкодисперсный ионит, распределенный в пленке инертного связующего материала. Гомогенные мембраны получаются в результате реакции поликонденсации или методом привитой полимеризации. Они характеризуются сплошной фазой ионита по всей пленке [1,...8].

### 1.3. КЛАССИФИКАЦИЯ ЭМП

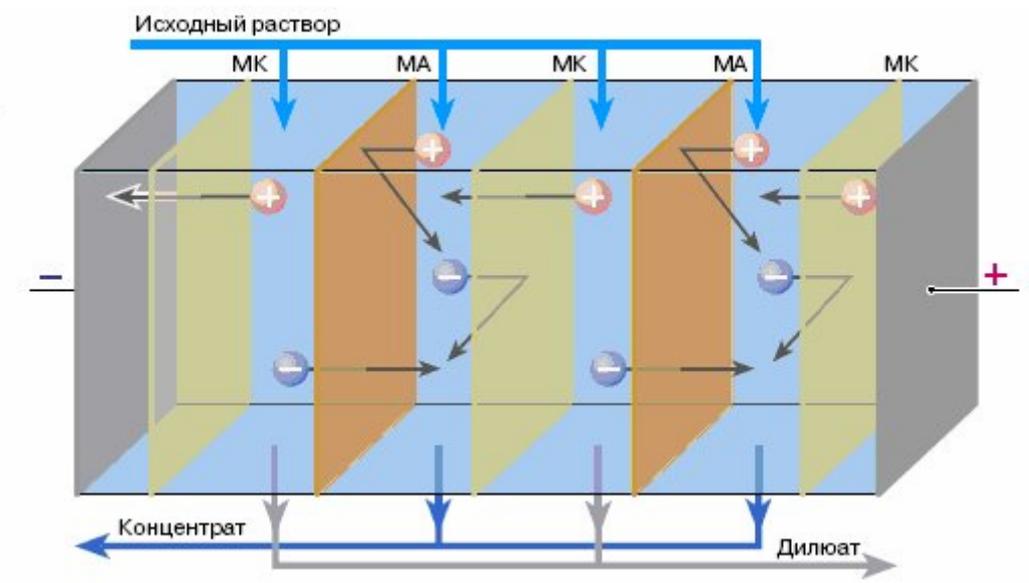
Существует несколько основных типов ЭМП, которые могут охватить широкий спектр задач, связанных с очисткой, выделением, получением и разделением различных веществ. Есть и такие процессы, которые предназначены для решения определенной производственной задачи, но каждый из них можно отнести к какому-либо основному процессу. Процессы в своей массе могут отличаться применяемым мембранным набором, использованием вынужденной или свободной конвекции, а также в использовании диалитического или осмотического потока раствора через мембрану.

На рис. 1.6 представлены принципиальные схемы использования мембран в процессах электромембранной технологии (электродиализ, мембранный электролиз) и в электрохимических устройствах типа топливных элементов. В любом из этих реакторов заряженные мембраны хорошо проводят электрический ток и обладают свойством избирательно пропускать ионы определенного знака. При всем многообразии практических приложений можно выделить два типа систем: электрохимические системы с мембранами, работающие во внешнем электрическом поле (рис. 1.6, а – в); электрохимические

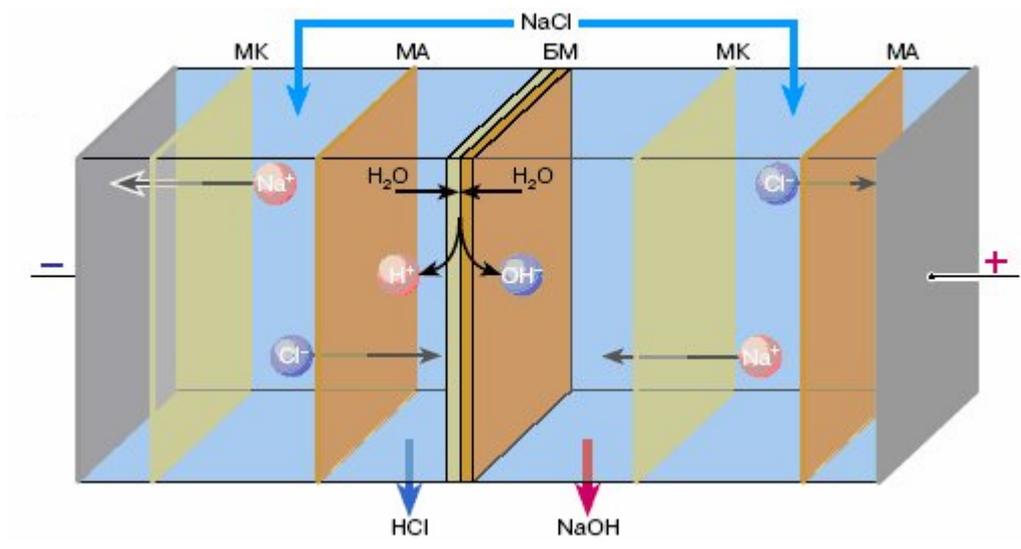
системы с мембранами в условиях равновесия, являющиеся генераторами электрической разности потенциалов (рис. 1.6, г).

Сорбция воды или раствора электролита формирует специфическую рабочую структуру мембран. С физико-химической точки зрения набухание и электропроводность мембран – это следствия так называемого перколяционного эффекта (или эффекта протекания): достижение определенного, порогового значения влагосодержания в ходе гидратации заряженных групп вызывает скачкообразное возрастание проводимости, достигающее двух–трех порядков. Этот удивительный эффект превращает диэлектрик в проводник электрического тока или в твердый электролит.

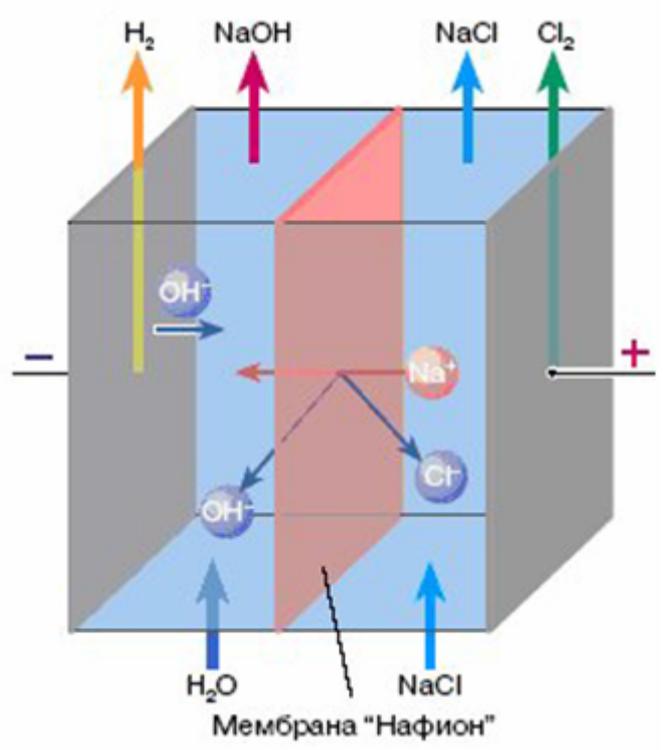
Другое электрохимическое свойство электромембран – селективность, то есть избирательная проницаемость ионов определенного знака (в электрическом поле). Например, идеально селективная катионообменная мембрана должна пропускать на 100% только катионы (рис. 1.6), но должна служить барьером для потока анионов. Соответственно анионообменная мембрана в идеальном случае на 100% проницаема для потока анионов. Вместе с ионами через мембрану переносится вода. Этот перенос обеспечивает так называемую электроосмотическую проницаемость мембран. Таким образом, высокая электропроводность и идеальная селективность мембран – это их основные транспортные свойства, обеспечивающие высокую производительность электромембранного процесса разделения (рис. 1.6).



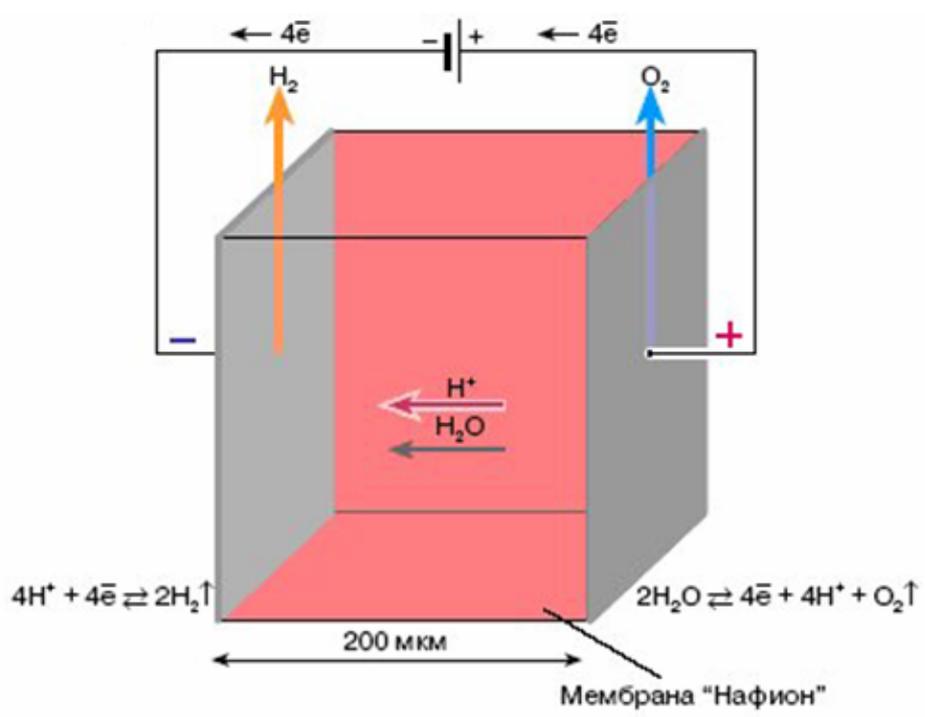
а



б



В



Г

Рис. 1.6. Схематическое изображение различных процессов с участием ионообменных мембран: а – электродиализ – процесс деминерализации и концентрирования водных растворов; б – биполярный электродиализ для получения кислот и щелочей из солевых растворов; в – мембранный электролиз с перфторированной сульфокатионитовой мембраной

для промышленного получения хлора и щелочи; г – ионоселективная мембрана как твердый электролит в топливных элементах.

На рис. 1.7 схематически изображена катионообменная мембрана как фрагмент электромембранной системы. Наложение на мембрану постоянного электрического поля вызывает направленное движение противоионов, или электромиграцию. Поэтому говорят, что набухшая в воде или растворе электролита идеальная мембрана является полиэлектролитом с униполярной проводимостью (в отличие от растворов электролитов, где ток переносят и катионы и анионы). Удельная электропроводность мембран сравнима с электропроводностью растворов электролитов. В сухом состоянии эти мембраны почти не проводят ток, и их относят к диэлектрикам.

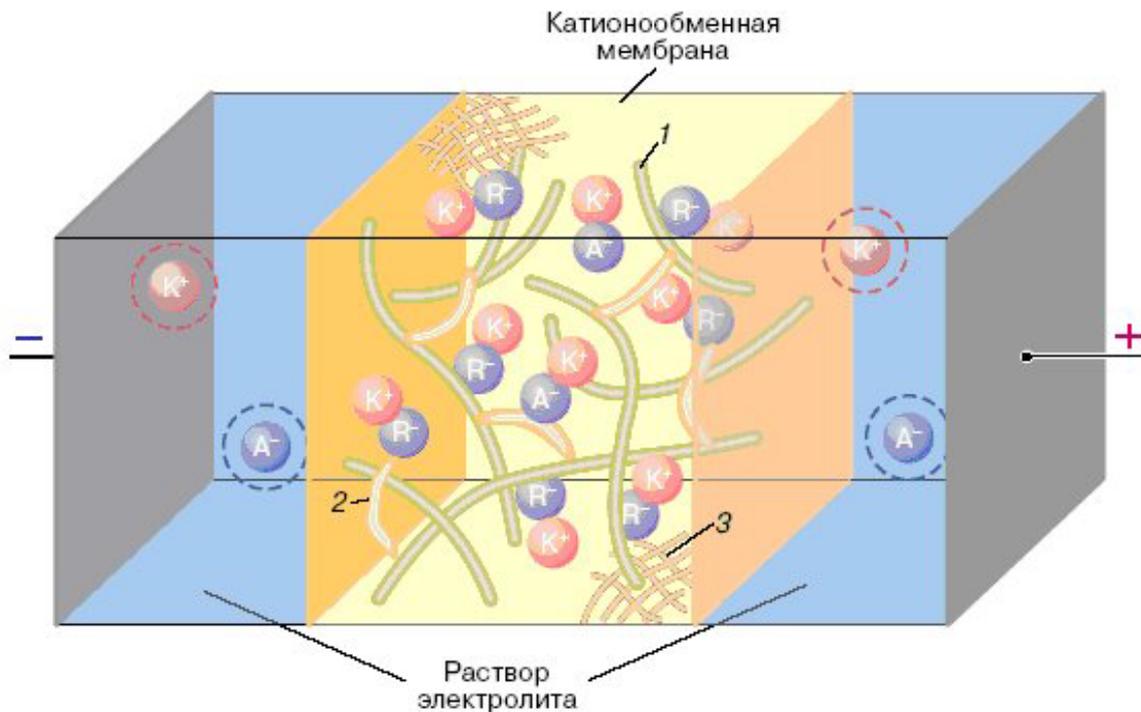


Рис. 1.7. Схематическое изображение фрагмента электромембранной системы:  
 R – фиксированные ионы; K, A – противоионы и коионы в мембране и растворе электролита; 1 – цепи полимерной матрицы, образующие каркас;  
 2 – мостики полимерного кроссагента, сшивающие основные полимерные цепи;  
 3 – включения инертного полимера, придающего композиции термическую и механическую прочность

Таблица 1.1. Группы электромембранных процессов

<i>Очистка неэлектролитов и их растворов, суспензий, эмульсий</i>	Очистка от солей растворов и водных смесей органических соединений и веществ: сывороток, аминокислот, витаминов, вакцин, крови, молока, сахара, патоки и полупродуктов их производства; соков, латексов, фотографических эмульсий, целлюлозной пульпы, черного щелока. Очистка от солей глицерина, органических кислот, мономеров, полупродуктов органического синтеза. Очистка молока от радиоактивных элементов.
<i>Очистка вод и водных растворов электролитов</i>	Обессоливание растворов электролитов. Деминерализация сточных вод (производства аммиачной селитры, гальванических, травильных, бытовых). Предварительная очистка воды для теплых энергетических установок. Очистка радиоактивных сточных вод.
<i>Концентрирование растворов</i>	Концентрирование сточных вод, содержащих ценные компоненты, в частности, редкие и драгоценные металлы, для последующего их извлечения. Концентрирование растворов солей урана, например, тетрафторида урана; сбросных карбонат-сульфатных растворов, азотной кислоты. Концентрирование растворов электролитов перед выпаркой, радиоактивных вод, недиффузируемых соединений, например, глюкозы, органических кислот с добавлением к ним соли.
<i>Процессы обмена</i>	Получение кислот и щелочей из солей, например, NaOH и муравьиной кислоты из формиата натрия; золя кремниевой кислоты из силиката натрия; бро место водородной кислоты и аммиака из бромида аммония. Реакция двойного обмена типа $AB+CD \rightarrow AD+CB$ , например, получение NaOH из NaCl и гидроксида кальция; приготовление фотографических эмульсий на основе AgBr, получение аминокaproновой кислоты из ее хлоргидрата, гидролиз солей в растворах полиэлектролитов. Регенерация кислоты из кислых травильных растворов. Корректировка pH растворов, в том числе водорастворимых лаков. Минерализация дистиллята.
<i>Процессы фракционирования</i>	Отделение многовалентных катионов от одновалентных. Разделение однозарядных катионов, например, K от Na. Разделение белковых гидролизатов на аминокислотные фракции. Разделение аминокислот, изменение ионного состава жидкостей, например, увеличение отношения Ca:Na в молоке. Отделение амфотерных катионов от неамфотерных.

#### 1.4. ТРЕБОВАНИЯ К ИОНООБМЕННЫМ МЕМБРАНАМ

Кроме химической устойчивости, механической прочности и стабильности размеров, мембраны должны обладать следующими качествами:

- Высокой ионной селективностью, то есть быть ничтожно проницаемыми по отношению к ионам того же знака, что и фиксированный ион мембраны. Селективность, выражаемая числом переноса противоиона в мембране, уменьшается с увеличением концентрации раствора, находящегося в контакте с мембраной.
- Высокой электрической проводимостью в наиболее разбавленных растворах, получающихся в процессе обессоливания. Этот фактор влияет на омическое сопротивление электродиализной ячейки.
- Ничтожной скоростью свободной диффузии электролита при разности концентраций, ожидаемой в процессе. Диффузия соли через мембрану действует в сторону, противоположную электролитическому переносу ионов, который является целью процесса, поэтому снижает эффективность. Свободная диффузия определяется разностью концентраций с двух сторон мембраны; когда эта разность увеличивается, скорость диффузии повышается. На величину диффузии влияет селективность мембран: чем выше селективность, тем меньше относительное увеличение диффузии для данной разности концентраций.
- Низкой осмотической проницаемостью. Ионитовые мембраны проявляют аномальные осмотические свойства в системах электролита; наиболее простой эффект заключается в том, что в системе электролита они обладают ненормально высоким осмотическим потоком по сравнению с системой не-электролита.

В настоящее время известно несколько сот мембранных материалов, из них около 50 типов принадлежат к ионообменным мембранам. Два обстоятельства стимулировали промышленное применение заряженных синтетических мембран: открытие эффекта высокой электропроводности ионитов в набухшем состоянии, которое было сделано Хейманом и О'Доннелом в 1948 году; использование разнополярных ионообменных мембран в электродиализном аппарате для обессоливания воды (работы Майера и Штраусса в Германии и Джуда и Мак-Рея в Америке, 1953 год).

Широкие области использования мембран позволяют решить многие экологические проблемы, сделать более эффективными методы лечения и методы использования энергоресурсов.

### **1. 5. Электродиализ**

Электродиализ – это процесс переноса ионов через мембрану под действием электрического поля, приложенного к мембране. Скорость переноса ионов может изменяться подбором соответствующей силы тока. Такой перенос может осуществляться против градиента концентрации.

Мембраны для обратного осмоса изотропные (с однородной по толщине структурой) или анизатропные, тонкие, чрезвычайно чувствительные к пересыханию, реально сохраняют свои свойства от 6 месяцев до года.

Мембраны для электродиализа грубые, композитные, чрезвычайно прочные; после высыхания восстанавливают свои свойства, что крайне важно в странах с жарким климатом; легко регенерируются растворами кислот. Срок службы мембран на капроновой или лавсановой основе – до 8 лет, а перфторированных – до 20 лет [6].

Наложение электрического поля приводит к трудностям, связанным с реакциями на электродах, то есть с образованием щелочи около катода и кислоты у анода. В присутствии хлоридов на аноде образуется также хлор (рис. 1.8). В связи с этим должны быть предприняты специальные меры для удаления из аппарата жидкости, содержащей эти вещества. В некоторых

случаях растворы из электродных камер могут вновь возвращаться в процесс (с контролем рН или без него).

Большинство ранних исследований в области электродиализа проводилось с трехкамерными ячейками с применением неселективных мембран. При этом обессоленный раствор получался в средней камере. В то же время этот раствор приобретал кислую реакцию из-за накапливания  $H^+$  ионов. Это являлось главным недостатком такой системы. Долгое время не верили, что эту трудность можно разрешить при помощи ионитовых мембран. Поэтому до начала 1950 г. не было промышленного производства этих мембран.

Кроме образования кислоты в камере обессоливания, процесс в трехкамерной ванне с применением неселективных мембран характеризуется низким выходом по току ( $n$ ), который равен отношению числа граммэквивалентов удаленных солей к количеству прошедшего электричества, выраженному в фарадеях (сообщалось о значении  $n=0,2$ ).

Главное преимущество процесса электродиализа с ионитовыми мембранами заключается в том, что все ионы, удаленные из камер обессоливания, или диализата, не должны обязательно выделяться на электродах, а могут собираться в камеры концентрирования, которые граничат со следующими камерами обессоливания. Эта идея лежит в основе многокамерного электродиализатора, предложенного Мейером и Штраусом в 1940 г. Число камер, которые можно поместить между электродами в многокамерной ячейке, ограничено только инженерными соображениями, такими, например, как максимально достижимое падение напряжения через ячейку, размеры аппаратов, прочность системы и гидродинамические факторы, связанные с равномерным распределением жидкости по всем камерам и по поверхностям мембран.

В аппарате применяются два вида мембран: мембраны, селективно проницаемые для катионов – катионитовые (катионообменные) мембраны, и мембраны, селективно проницаемые для анионов – анионитовые (анионообменные) мембраны. Они заключены между двумя электродами.