

УТВЕРЖДАЮ:

Декан ФТФ

 Бойко В.И.

«15» ноября 2008 г.

**Л.И. Дорофеева**

## **РАСЧЁТ ОПТИМАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОДИАЛИЗАТОРА**

Методические указания к выполнению лабораторной работы по курсу  
«Ионообменные технологии» для магистрантов, обучающихся  
по магистерской программе 010706 «Физика кинетических явлений»  
направления 010700 «Физика»

Издательство  
Томского политехнического университета  
2008

УДК 537.569(076.5)

ББК 22.333я73

Д69

**Дорофеева Л.И.**

Д69      Расчёт оптимальных условий работы электродиализатора: методические указания к выполнению лабораторной работы по курсу «Ионообменные технологии» для магистрантов, обучающихся по магистерской программе 010706 «Физика кинетических явлений» направления 010700 «Физика» / Л.И. Дорофеева. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – 11 с.

ISBN 5-98298-290-3

УДК 537.569(076.5)

ББК 22.333я73

Методические указания рассмотрены и рекомендованы  
к изданию методическим семинаром  
кафедры технической физики ФТФ  
«28» июня 2007 года.

Зав. кафедрой ТФ

доктор физико-математических наук,  
профессор



В.А. Власов

Председатель

учебно-методической комиссии ФТФ



В.Д. Каратаев

*Рецензент*

Доктор физико-математических наук, профессор ТПУ

*А.П. Вергун*

ISBN 5-98298-290-3

© Дорофеева Л.И., 2008

© Томский политехнический университет, 2008

© Оформление. Издательство Томского  
политехнического университета, 2008

**Цель работы** изучить принцип работы и конструкцию многокамерного электродиализатора, определить оптимальные условия работы, критическую скорость и минимальный объёмный расход в электродиализаторе.

## 1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Обессоливание воды в производственных условиях осуществляется с использованием многокамерных электродиализаторов, изготовленных из электроизоляционного полимерного материала и разделенных на секции чередующимися анионообменными и катионообменными мембранами, как это показано на рис. 1.

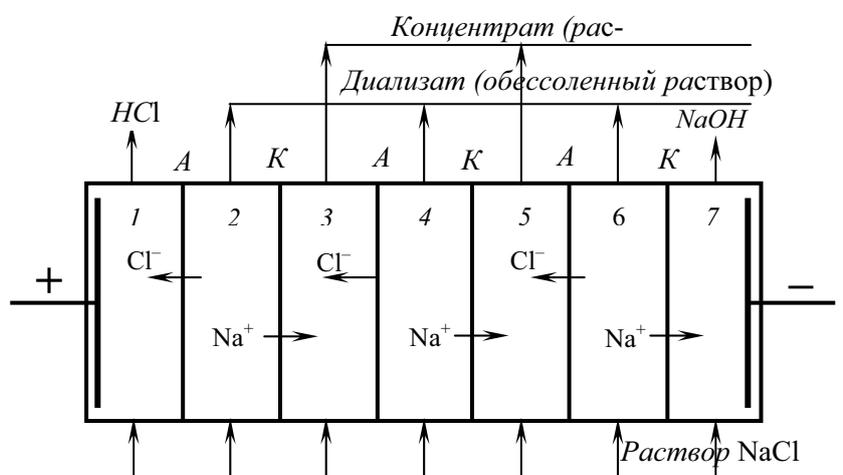


Рис. 1. Схема прямого многокамерного электродиализатора:  
А, К – анионообменная, катионообменная мембраны

Анод аппарата, работающий в условиях сильной коррозии, изготавливается из платинированного титана, поэтому для экономии дорогостоящего материала и снижения габаритов промышленных установок серийные электродиализаторы содержат сотни и даже тысячи секций, построенных по единому матричному образцу из чередующихся анионообменных и катионообменных мембран.

Для иллюстрации принципа работы таких установок достаточно проанализировать функции семисекционного аппарата.

Исходный раствор ( $\text{NaCl}$ ) подается во все камеры. При наложении на систему градиента электрического потенциала из каждой четной секции электродиализатора, называемой секцией деионизации (обессоливания) – 2, 4, 6, катионы мигрируют к катоду и переносятся постоянным электрическим током через катионообменные мембраны в нечетные секции – 3, 5, 7. Дальнейшая электромиграция катионов к катоду ограничена

малопроницаемыми для них анионообменными мембранами. Анионы из растворов секций деионизации – 2, 4, 6 мигрируют по направлению к аноду через анионообменные мембраны, однако на пути к аноду их миграцию ограничивают малопроницаемые для анионов катионообменные мембраны и они накапливаются также, как и катионы, в нечетных секциях, которые называют секциями концентрирования (рассольными).

Таким образом, в чётных камерах происходит деминерализация раствора, а в нечётных (кроме крайних) – его концентрирование. В катодной камере раствор подщелачивается, а в анодной камере подкисляется. В результате растворы равных концентраций, поступающие во все секции почти удваивают концентрацию в секциях концентрирования – 3, 5, а концентрация вытекающего раствора из секций деионизации близка к нулю. На выходе мы получаем два потока: поток очищенный от ионов (диализат) и поток с повышенной концентрацией соли (рассол).

Процесс электродиализа можно вести при различной плотности тока. Чем выше плотность тока, тем больше производительность аппарата, меньше амортизационные отчисления на здание, аппаратуру, меньше расходы на заработную плату, но больше расход электроэнергии на 1 м<sup>3</sup> раствора. С увеличением скорости потока снижается расход электроэнергии на перенос ионов, но возрастают затраты на перекачку жидкости. При уменьшении межмембранного расстояния падает расход электроэнергии на перенос ионов и растут затраты на преодоление гидродинамического сопротивления камер. Стоимость 1 м<sup>3</sup> очищенного раствора находится в сложной функциональной зависимости от перечисленных выше факторов и при определенном их подборе может быть минимальной.

Примем стоимость 1 м<sup>3</sup> очищенного раствора за критерий качества при постановке задачи оптимизации электродиализатора. Стоимость 1 м<sup>3</sup> очищенного раствора

$$C = C_{И} (1 + m_{к}^{-1}) + \frac{A + O + \gamma (N_{Э} + N_{Н})}{Q} + p m_{к},$$

где  $C_{И}$  – стоимость исходной воды, руб./м<sup>3</sup>;  $m_{к}$  – степень концентрирования;  $A$  – амортизационные отчисления на здание и оборудование, руб./ч;  $O$  – затраты труда на обслуживание, руб./ч;  $N_{Э}$ ,  $N_{Н}$  – электрическая мощность соответственно электродиализатора и насосной установки, кВт;  $p$  – стоимость добавляемых в концентрат реактивов, руб./м<sup>3</sup>;  $\gamma$  – стоимость 1 кВт·ч электроэнергии;  $Q$  – производительность аппарата, м<sup>3</sup>/ч.

$$Q = \frac{\eta I n_o}{(C_0 - C_1) F},$$

где  $n_0$  – число камер обессоливания в электродиализаторе;  $C_0, C_1$  – начальная и конечная концентрация обрабатываемого раствора, г-экв/л;  $\eta$  – выход по току.

Мощность электродиализатора:

$$N_3 = \frac{I U}{\eta_e},$$

где  $\eta_e$  – коэффициент полезного действия выпрямителя;  $U$  – падение напряжения на электродиализаторе, В.

Если величины  $C_0$  и  $C_1$  заданы, то для  $U$  может быть записано следующее общее выражение:

$$U = f(I, k, n_o, \mathcal{G}),$$

где  $k$  – совокупность параметров, определяющих конструкцию электродиализатора;  $\mathcal{G}$  – скорость циркуляции очищаемого раствора.

Мощность насоса в системе протока через камеры обессоливания:

$$N_0 = \xi \mathcal{G}$$

где  $\xi$  – коэффициент гидравлического сопротивления тракта очищаемого раствора, входящий в группу параметров  $k$ .

Мощность насосной установки:

$$N_n = N_o + N_a + N_k$$

где  $N_a, N_k, N_o$  – мощность насосов, прогоняющих воду через камеры электродные, концентрирования и обессоливания соответственно.

Мощности  $N_a, N_k$  выбираются из конструктивных соображений, так как скорость протока жидкости через электродные камеры и камеры концентрирования практически не влияет на процесс электродиализа.

Используем описанную математическую модель электродиализатора для постановки задачи выбора его оптимальных параметров. Все параметры можно разбить на три группы:

- параметры, являющиеся исходными данными:  $U_u, m_k, u, p, \eta_e, C_0, C_1$ ;
- параметры, слабо влияющие на критерий качества при выбранном типе электродиализаторов, в первом приближении их можно считать постоянными и также относящимися к исходным данным:  $A, O, N_a, N_k, \eta$ ;
- параметры, сильно влияющие на критерий качества, которые принимаем за переменные:  $I, \mathcal{G}, n_o, k$ .

При определении оптимальных условий процесса необходимо также учитывать критические значения потоков концентрата и диализата. Если скорость подвода вещества в камеры электродиализатора будет меньше критической, то возникает явление поляризации мембран, а также разложе-

ние воды с образованием ионов водорода  $H^+$  и гидроксила  $OH^-$ , которые начинают участвовать в процессе переноса тока. В результате выход по току падает, т. е. уменьшается перенос извлекаемых из раствора ионов. Для устранения данных явлений проводится расчёт критического значения расхода ( $Q_{кр}$ ) по каждой линии: диализата и концентрата, в зависимости от числа ячеек на линии ( $n_d$  или  $n_k$ ):

$$Q_{кр} = \frac{V_{кр} \omega d n}{0.278 S}, \quad \left[ \frac{см^3}{с} \right], \quad (1)$$

где  $V_{кр}$  – критическая скорость движения раствора;  $\omega$  – ширина камеры электродиализатора;  $d$  – межмембранное расстояние;  $n$  – число ячеек на линии диализата и концентрата ( $n_d$  или  $n_k$ );  $S$  – число ступеней обессоливания.

Скорость подвода вещества к ячейке электродиализатора ( $V_{яч}$ ) выбирается с точки зрения создания условий деполяризации, когда её значение не ниже критической скорости ( $V_{кр}$ ):

$$V_{яч} \geq V_{кр}. \quad (2)$$

Критическая скорость определяется из графика (рис. 2), построенного на основе определения оптимальной плотности тока в аппарате:

$$V_{кр} = \frac{k' i_{опт}}{C_{ср} d}, \quad \left[ \frac{см}{с} \right], \quad (3)$$

где  $i_{опт}$  – оптимальная плотность тока;  $C_{ср}$  – средняя концентрация соли;  $k$  – коэффициент, определяемый графически.

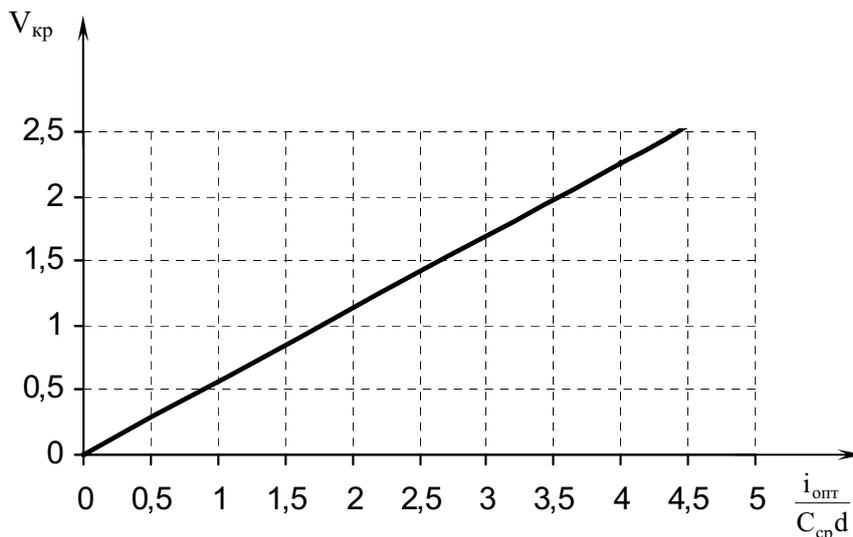


Рис. 2. График определения критической скорости подвода вещества к ячейке электродиализатора

Средняя концентрация соли определяется по формуле:

$$C_{\text{ср}} = \frac{C_0 - C_1}{\ln \frac{C_0}{C_1}}, \quad \left[ \frac{\text{г}}{\text{л}} \right], \quad (4)$$

где  $C_0$  – начальная концентрация соли;  $C_1$  – конечная концентрация соли.

Оптимальная плотность тока находится из соотношения:

$$i_{\text{опт}} = \sqrt{\frac{1.042 \times 10^{-4} \frac{d_m}{P Y}}{0.46 \times 10^{-3} r_{\text{ср}} \frac{d_p}{m}}}, \quad \left[ \frac{\text{А}}{\text{см}^2} \right], \quad (5)$$

где  $d_m$  – стоимость 1 см<sup>2</sup> мембраны, [руб./см<sup>2</sup>];  $P$  – эффективная площадь мембраны, 0.7...0.9;  $Y$  – срок службы мембраны, 1 год;  $d_p$  – стоимость электроэнергии, [руб./кВт·ч];  $m$  – коэффициент полезного действия;  $r_{\text{ср}}$  – среднее электросопротивление ячейки, определяется с учётом удельного сопротивления ( $\rho$ ) и толщины ( $\ell$ ) в расчёте на мембраны и раствор:

$$r_{\text{ср}} = (\rho_{\text{МА}} \cdot \ell_{\text{МА}} + \rho_{\text{МК}} \cdot \ell_{\text{МК}} + 2\rho_p \cdot \ell_p) \cdot M, \quad (6)$$

$M$  – коэффициент, учитывающий увеличение электросопротивления в ячейке при наличии прокладок в электродиализаторе, 2...3.

Значения  $\rho$  и  $\ell$  определяются по табл.1.

Таблица 1

Измеряемая величина	МК-40	МА-40	Раствор
Толщина образца, $\ell$ [см]	0,07	0,05	0,1
Удельное электросопротивление, $\rho$ [Ом·см]	234	340	79.5

## 2. ПОРЯДОК РАБОТЫ

1. Изучить принцип работы многокамерного электродиализатора.
2. Определить критическую скорость и критический расход раствора в семисекционном аппарате по линии диализата ( $Q_{\text{кр1}}$ ,  $V_{\text{кр}}$ ) и концентрата ( $Q_{\text{кр2}}$ ,  $V_{\text{кр}}$ ) при следующих исходных данных:

$$C_0 = 0,6 \quad 1,2 \quad 1,8 \quad 2,4 \quad 3,0 \quad 3,3 \quad 3,6 \quad 3,9 \quad 4,2 \quad 4,5, \text{ г/л}$$

$$C_1 = 0,3, \quad \text{г/л}$$

$\omega = 4,3$  см,  $d = 0,7$  см.

3. Построить зависимости  $Q_{кр1} = f(C_0)$ ,  $Q_{кр2} = f(C_0)$ ,  $V_{кр} = f(C_0)$ .
4. Проанализировать изменение критического расхода и критической скорости в аппарате с увеличением концентрации ионов в растворе.
5. Сделать выводы.

### 3. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Привести схему и объяснить принцип действия семисекционного электродиализного аппарата.
2. Из каких условий выбирается скорость подвода вещества к ячейке электродиализатора.
3. Чем определяется критическая скорость раствора в аппарате, привести формулу.
4. Записать формулу, определяющую величину критического расхода, объяснить физический смысл.
5. Какие составляющие определяют величину среднего электрического сопротивления в электродиализаторе, их вклад.
6. Объяснить влияние изменения концентрации ионов в растворе на критический расход и критическую скорость в аппарате.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гребенюк В.Д. Электродиализ. – Киев: Техніка, 1976. – 160 с.
2. Кульский Л.А., Страхов Э.Б., Волошинова А.М. Технология водоочистки на атомных энергетических установках. – Киев: Наукова Думка, 1986. – 272 с.
3. Шапошник В.А., Григорчук О.В. Кинетика деминерализации воды с ионообменными мембранами // Вестник ВГУ. – 2000. – С. 13–19.
4. Вергун А.П. и др. Разделение изотопов и тонкая очистка веществ электроионитными и обменными методами: учебное пособие – Томск: ИПФ ТПУ, 2000. – 68 с.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

1. Теоретическая часть.....	3
2. Порядок работы.....	7
3. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ .....	8
Список литературы .....	9

Учебное издание

Дорофеева Людмила Ивановна

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ИОНООБМЕННОГО СЛОЯ

Методические указания к выполнению лабораторной работы по курсу  
«Ионообменные технологии» для магистрантов, обучающихся  
по магистерской программе 010706 «Физика кинетических явлений»  
направления 010700 «Физика»

Научный редактор

Доктор физико-математических наук  
профессор

*В.Ф. Мышкин*

Верстка

*В.П. Аршинова*

Дизайн обложки

*О.Ю. Аршинова  
О.А. Дмитриев*

Подписано к печати 17.11.2008. Формат 60х84/16. Бумага «Снегурочка».

Печать XEROX. Усл.печ.л. 0,81. Уч.-изд.л. 0,74.

Заказ 887. Тираж 100 экз.



Томский политехнический университет  
Система менеджмента качества  
Томского политехнического университета сертифицирована  
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту ISO 9001:2000



ИЗДАТЕЛЬСТВО  ТПУ. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.