

На правах рукописи



ХОРОХОРИНА Ирина Владимировна

**КИНЕТИКА И СТРУКТУРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
МЕМБРАН ЭЛЕКТРОУЛЬТРАФИЛЬТРАЦИОННОЙ
ОЧИСТКИ ПРОМЫШЛЕННЫХ РАСТВОРОВ
ОТ АНИОННЫХ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ**

Специальность 05.17.08 – Процессы и аппараты химических технологий

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Тамбов 2014

Работа выполнена в Научно-образовательном центре «Безотходные и малоотходные технологии» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Тамбовский государственный технический университет» (ФГБОУ ВПО «ТГТУ») – ФБГНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве».

Научный руководитель

Лазарев Сергей Иванович,
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Кретов Иван Тихонович,
доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки и техники РФ, профессор кафедры «Машины и аппараты пищевых производств» ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный университет инженерных технологий»

Пачина Ольга Владимировна,
кандидат технических наук, доцент кафедры «Машины, аппараты пищевых производств и теплотехника» Энгельсского технологического института (филиала) ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю. А.»

Ведущая организация

ФГБОУ ВПО «Казанский национальный исследовательский технологический университет»

Защита диссертации состоится 29 декабря 2014 г. в 11 часов на заседании диссертационного совета Д 212.260.02 при ФГБОУ ВПО «ТГТУ» по адресу: г. Тамбов, ул. Ленинградская, д. 1, ауд. 60.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью, направлять по адресу: 392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106, ФГБОУ ВПО «ТГТУ», ученому секретарю диссертационного совета Д 212.260.02.

Электронная почта диссертационного совета: d.sov21202@tstu.ru; факс: 8(4752)632024.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «ТГТУ», с авторефератом диссертации – на официальном сайте ФГБОУ ВПО «ТГТУ» <http://www.tstu.ru> и ВАК Минобрнауки РФ <http://vak.ed.gov.ru>.

Автореферат разослан «__» _____ 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Нечаев Василий Михайлович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Поверхностно-активные вещества (ПАВ) нашли широкое применение в различных отраслях промышленности. В качестве основных ПАВ используются анионные вещества, которые обеспечивают достаточный моющий эффект и пенообразование. Для промышленных растворов, содержащих анионные поверхностно-активные (АПАВ) вещества, перспективными методами очистки являются мембранные процессы разделения.

Одним из методов мембранной технологии является электроультрафильтрация, происходящая при одновременном воздействии градиента давления и электрического потенциала. Основные преимущества электроультрафильтрационной технологии связаны с экологичностью, малой металло- и энергоемкостью и простотой конструктивного оформления.

В настоящей работе исследовались кинетика и структурные характеристики мембран процесса электроультрафильтрационной очистки промышленных растворов от анионных поверхностно-активных веществ.

Работа выполнена при поддержке федерально-целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (гос. контракты № 16.740.11.0525, 14.740.11.1028, 16.740.11.0659) и по гранту целевого аспиранта № 14.132.21.1472.

Цель работы – исследование кинетики и структурных характеристик мембран электроультрафильтрационной очистки промышленных растворов от анионных поверхностно-активных веществ.

Научная новизна. Разработана ячейка и методики для исследования радиуса пор и мембранного потенциала полупроницаемых мембран, позволяющие численно определять радиусы пор в активном слое мембран и величины мембранного потенциала.

Получены экспериментальные данные по коэффициенту задержания, удельному потоку растворителя и коэффициенту распределения промышленных растворов, содержащих анионные поверхностно-активные вещества, в зависимости от концентрации, температуры и плотности тока, которые использованы в аппроксимационных зависимостях для получения численных значений эмпирических коэффициентов.

Уточнена математическая модель массопереноса в процессе электроультрафильтрационного разделения растворов, содержащих АПАВ, посредством учета мембранного потенциала и радиуса пор мембран в уравнениях, использованных в модели, что позволяет повысить точность определения коэффициента задержания.

Практическая значимость. Разработана программа для расчета конструктивных параметров электробаромембранного аппарата трубчатого типа и его рабочей площади (св-во о рег. № 2012616716).

Предложена методика инженерного расчета рабочей площади и количества элементов электроультрафильтрационного аппарата.

Предложена схема очистки промышленных растворов ОАО «Кирсановский завод текстильного машиностроения» от анионных поверхностно-активных веществ с ожидаемым экономическим эффектом 200 тыс. р. в год в ценах 2014 г. Схема включает в себя электроультрафильтрационный аппарат, позволяющий очищать стоки до предельно допустимых концентраций.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы были доложены на: международной конференции «Ion transport in organic and inorganic membranes» (Туапсе, 2011); международной научно-практической конференции «Решение региональных экологических проблем» (г. Тамбов, 2011); международной конференции «Перспективные разработки науки и техники» (Польша, 2011); международной научно-практической конференции «Инновационные проекты в области агроинженерии» (Москва, 2012); 8-й Международной научно-практической конференции «Дни науки-2012» (Прага, 2012); 78-й Научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов (Киев, 2012); международной научной конференции им. В. И. Вернадского «Наука и образование для устойчивого развития экономики, природы и общества» (Тамбов, 2013); XIV конференции с международным участием «Иониты-2014» (Воронеж, 2014).

Публикации. По результатам диссертационной работы опубликованы 22 работы, в том числе 10 статей в журналах, рекомендованных ВАК РФ, свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав и выводов, списка используемых источников и приложения. Диссертация содержит 130 страниц машинописного текста, в том числе 41 рисунок, 15 таблиц, список цитируемых источников, который включает 108 наименований публикаций отечественных и зарубежных авторов.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение. Обоснована актуальность темы диссертации, ее научная новизна и практическая значимость, сформулированы цель и задачи работы.

В первой главе проведен обзор литературных данных. Рассмотрены кинетика процессов электромембранного разделения растворов и структурные характеристики мембран. На основании анализа литературных данных сделан вывод о том, что кинетика и структурные характеристики мембран процесса электромембранной очистки промышленных растворов от АПАВ мало изучены.

Вторая глава посвящена описанию разработанных и усовершенствованных методик и конструкций ячеек для проведения экспериментальных исследований структурных и проницаемых характеристик мембран. В качестве объектов исследования использовался водный раствор лаурилсульфата натрия, водный раствор гидрокарбоната натрия и полупроницаемые мембраны.

Исследования порового пространства мембран методом малоуглового рентгеновского рассеивания проводились на установке КРМ-1, включающей в себя питающий аппарат ДРОН-3, малоугловой гониометр, счетчик БДС-6, персональный компьютер (ПК).

Для изучения мембранного потенциала проводились измерения разности потенциалов на мембранах МГА-95, МГА-100 в разборной ячейке (рис. 1) с двумя симметричными сосудами, в которых закреплялись угольные электроды и манометрические трубки.

Разность потенциалов измерялась высокоомным цифровым вольтметром с последующей передачей данных через

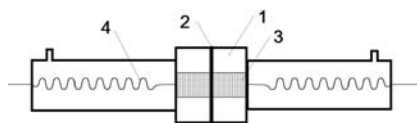


Рис. 1. Измерительная ячейка:

1 – резьбовое соединение; 2 – мембрана;
3 – угольный электрод; 4 – трубки

COM-порт на ПК с возможностью записи через 0,5 с, что позволяло следить за величиной мембранного потенциала $\varphi(t)$ в реальном времени.

По концентрациям растворенного вещества в образцах полупроницаемых мембран и в исходных растворах рассчитывали коэффициент распределения по формуле:

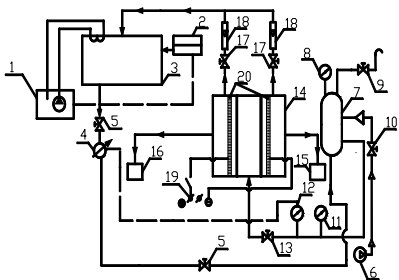
$$k_p = C_m / C_{исх}, \quad (1)$$

где C_m , $C_{исх}$ – концентрации растворенных веществ в мембране и исходном растворе, мг/л.

Исследования коэффициента задержания и удельного потока растворителя проводились на установке, схема которой изображена на рис. 2.

Рис. 2. Схема электроультрафильтрационной установки для исследования коэффициента задержания и удельного потока растворителя:

1 – термостат; 2 – потенциометр; 3 – емкость; 4 – плунжерный насос; 5, 9, 10, 13, 17 – дроссель; 6 – компрессор высокого давления; 7 – ресивер; 8, 11 – манометр; 12 – электроконтактный манометр; 14 – электроультрафильтрационный аппарат; 15, 16 – емкости для сбора пермеата, 18 – поплавковый ротаметр; 19 – источник постоянного тока; 20 – пористые электроды



По концентрациям растворенного вещества в пермеате и в исходных растворах рассчитывали коэффициент задержания по формуле:

$$K = 1 - \frac{C_{пер}}{C_{исх}} \cdot 100 \%, \quad (2)$$

где $C_{пер}$ – концентрация растворенных веществ в пермеате, мг/л.

Значение удельного потока растворителя рассчитывали по уравнению:

$$J = V / (F_m \tau), \quad (3)$$

где V – объем пермеата, m^3 ; F_m – площадь мембраны, m^2 ; τ – время проведения эксперимента, с.

Третья глава посвящена изложению и анализу результатов экспериментальных исследований. Измерение интенсивности малоуглового рентгеновского рассеяния осуществляли на установке КРМ-1. На рис. 3 сплошной линией представлена экспериментальная зависимость импульса от угла рассеяния, пунктирной линией – модельная функция типа $I(s) = N^2 \exp(-bs^2)$. Прологарифмировав функцию $\ln I(s)$, можно выделить прямолинейные участки с различными углами наклона (рис. 4).

Выделяя данные участки и определив тангенсы угла их наклона, были рассчитаны радиусы пор мембраны:

$$r_k = \sqrt{(5R_{gk}/3)}, \quad (4)$$

где R_{gk} – радиус инерции:

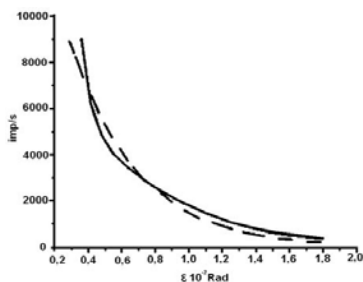


Рис. 3. Исходная дифрактограмма для мембраны МГА-95

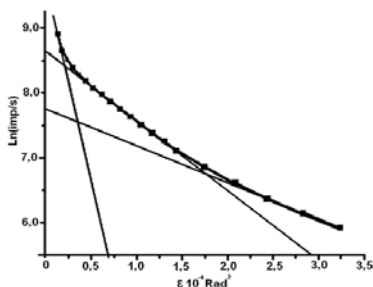


Рис. 4. Кривая $(\ln I, \varepsilon^2)$ для мембраны МГА-95

$$R_{gk} = 0,644 \sqrt{\operatorname{tg}(\alpha)} . \quad (5)$$

Значение радиусов инерции и радиусов пор для мембран сведены в табл. 1.

Таблица 1

Мембрана	R_{g1} (нм)	r_1 (нм)	R_{g2} (нм)	r_2 (нм)	R_{g3} (нм)	r_3 (нм)
ЕСРА	4,8	6,2	6,4	8,3	19	25
МГА-95	5	6,4	6,7	8,6	16	20

Экспериментальные зависимости мембранного потенциала от времени процесса сорбции воды и прямого осмоса гидрокарбоната натрия полупроницаемой мембраны вида МГА-95 приведены на рис. 5.

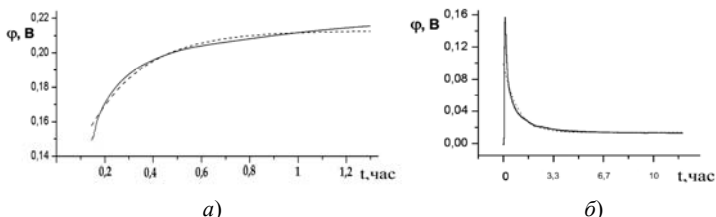


Рис. 5. Зависимость мембранного потенциала от времени $\varphi(t)$ при сорбции воды (а), при полном осмосе (б) мембраны МГА-95: сплошная – эксперимент, пунктир – расчет

Функциональная зависимость потенциала от времени при сорбции воды может быть представлена уравнением:

$$\varphi = \varphi_{\max} - \varphi_0 \cdot e^{-\beta t} , \quad (6)$$

где β – коэффициент сорбции, а $\varphi_0 \cdot e^{-\beta t} = \zeta$ – дзета-потенциал.

Уравнение (6) описывает возрастающую часть кривой на рис. 5, а и б. Для описания убывающей части (рис. 5, б) предложено уравнение:

$$\varphi_{\text{осм}} = \varphi_{\min} + \varphi_0 \cdot e^{-P(t-\tau)} , \quad (7)$$

где P – коэффициент диффузионной проницаемости; t – время эксперимента; τ – время сорбции мембраны в растворе до максимального потенциала.

Коэффициент диффузионной проницаемости определяли из формулы (7):

$$P = \frac{\ln \frac{\varphi_1}{\varphi_2}}{t - \tau} \quad (8)$$

Данные β , P , $\varphi_0 \cdot e^{-P(t-\tau)} = \zeta$ – дзета-потенциал представлены в табл. 2.

Таблица 2

Марка мембраны	Сорбция				Прямой осмос				
	ζ -потенциал		$\varphi_{\max}$	β	ζ -потенциал		$\varphi_{\min}$	β	P
	min	max	мВ	$\cdot 10^{-3},$ c^{-1}	min	max	мВ	$\cdot 10^{-3},$ c^{-1}	$\cdot 10^{-7},$ m^2/c
	мВ	мВ			мВ	мВ			
МГА-95	-19,6	-53	164	9	+26	+70	28	5,5	11
МГА-100	-27	-75	215	5	+23	+62	202	2,5	3,4

Экспериментальные и расчетные данные по коэффициенту распределения для мембран в водном растворе АПАВ представлены на рис. 6.

Для расчета коэффициента распределения предложено выражение вида:

$$k_p = (b C_{\text{исх}}^n (293/T)^m) / C_{\text{исх}} \quad (9)$$

где b , n , m – эмпирические коэффициенты, зависящие от природы исследуемых растворов и типа мембран.

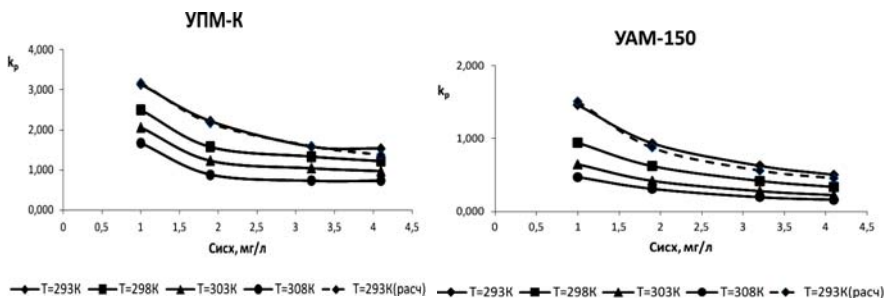


Рис. 6. Зависимость коэффициента распределения от концентрации исходного раствора АПАВ для мембран УАМ-150 и УПМ-К:
сплошная – эксперимент, пунктир – расчет

Значения эмпирических коэффициентов уравнения (9) представлены в табл. 3.

Таблица 3

Мембрана	b	n	m
УАМ-150	1,1510	0,2902	1,6781
УПМ-К	3,1651	0,4117	1,0360

Экспериментальные зависимости по коэффициенту задержания от давления и плотности тока для мембран УПМ-К и УАМ-150 в водном растворе АПАВ представлены на рис. 7 и 8.

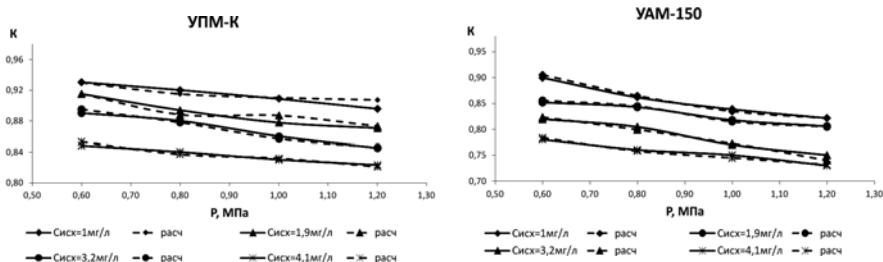


Рис. 7. Зависимость коэффициента задержания от давления раствора АПАВ (Сисх = 1 мг/л) для мембран УПМ-К и УАМ-150: сплошная – эксперимент, пунктир – расчет

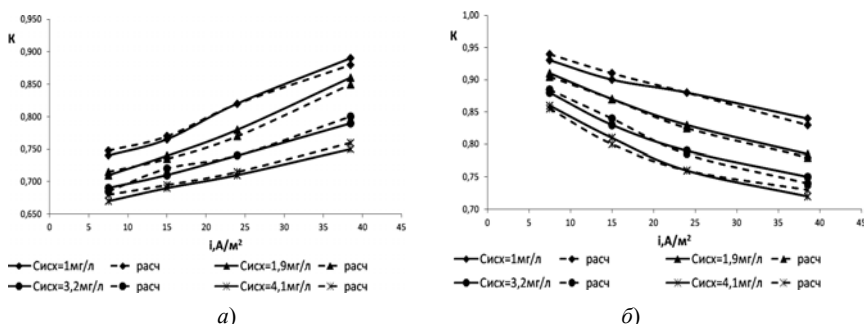


Рис. 8. Зависимость коэффициента задержания от плотности тока в водном растворе АПАВ для мембраны УПМ-К прианодной (а) и прикатодной (б)

Для расчета коэффициента задержания использовалось уравнение, предложенное Б. В. Дерягиным и др.:

$$K = 1 - \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{k_p k_1} - 1 \right) \left[1 - \exp \left(- \frac{J k_p k_2}{D_d} \right) \right] \cdot \exp(-J k_3)}, \quad (10)$$

где k_1 , k_2 , k_3 – эмпирические коэффициенты; k_p – коэффициент распределения мембран; D_d – коэффициент диффузии, $\text{м}^2/\text{с}$.

Для расчета коэффициента задержания с наложением электрического поля использовано модифицированное уравнение Б. В. Дерягина и др.:

для прианодной мембраны

$$K = 1 - \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{k_4 k_p} - 1 \right) \left[1 - \exp \left(- \frac{k_5 J k_p i \eta}{D_d k_p i \eta + M_{\text{эд}}} \right) \right] \exp(-k_6 J)}, \quad (11a)$$

для прикатодной мембраны

$$K = \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{k_4 k_p} - 1 \right) \left[1 - \exp \left(- \frac{k_5 J k_p i \eta}{D_d k_p i \eta + M_{эд}} \right) \right] \exp(-k_6 J)}, \quad (116)$$

где k_4 , k_5 , k_6 – эмпирические коэффициенты; i – плотность тока, А/м²; η – выход по току; $M_{эд}$ – электродиффузионный поток, кг/(м²·с).

Значения эмпирических коэффициентов уравнений (10) и (11) представлены в табл. 4.

Таблица 4

Мембрана	k_1	k_2	k_3	Мембрана	k_4	k_5	k_6
УАМ-150	0,0025641	0,0002273	27351	УПМ-К (прианод)	0,0005574	0,346	26543
УПМ-К	0,0015354	0,0002112	25436	УПМ-К (прикатод)	0,204	8,653	27564

Экспериментальные зависимости удельного потока растворителя от давления и плотности тока для мембран УПМ-К и УАМ-150 в водном растворе АПАВ представлены на рис. 9 и 10.

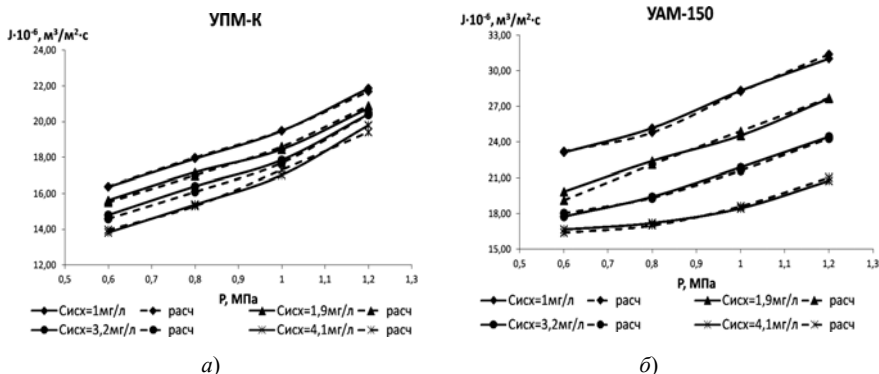


Рис. 9. Зависимость удельного потока растворителя от давления исходного раствора АПАВ для мембран УПМ-К (а) и УАМ-150 (б)

Для расчета удельного потока растворителя использовалась модифицированная формула закона Дарси:

$$J = k(\Delta P - (B \exp(n C_{исх}) \exp(A/T))), \quad (12)$$

где B , n , A – эмпирические коэффициенты; ΔP – рабочее давление, МПа.

Для расчета удельного потока растворителя с наложением электрического поля применено модифицированное уравнение, основанное на законе Дарси:

$$J = k(\Delta P - (B_i \exp(n_i C_{исх}) \exp(A_i/T) i \eta)), \quad (13)$$

где B_i , n_i , A_i – эмпирические коэффициенты.

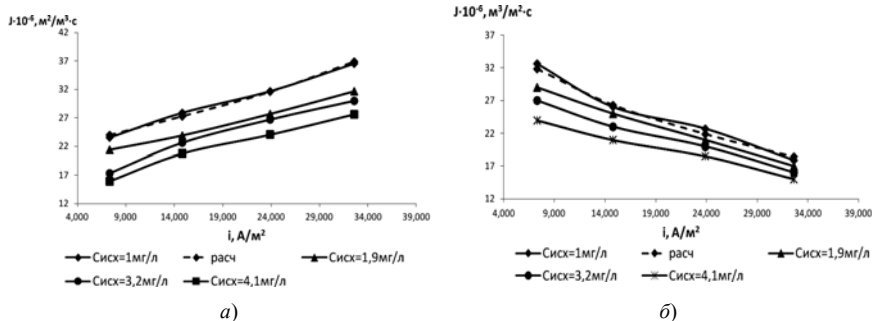


Рис. 10. Зависимость удельного потока растворителя от плотности тока в водном растворе АПАВ для мембран УПМ-К прианодной (а) и прикатодной (б)

Значения эмпирических коэффициентов уравнений (12) и (13) представлены в табл. 5.

Таблица 5

Мембрана	B	n	A	Мембрана	B_i	n_i	A_i
УАМ-150	-10,530	-0,592	1,8570	УПМ-К (прианод)	-2,1652	-1,953	2,78
УПМ-К	-12,743	-0,962	3,8726	УПМ-К (прикатод)	-0,742	-0,49325	9,671

Четвертая глава посвящена уточнению математической модели массопереноса в электроультрафильтрационных аппаратах. В предложенной модели, в отличие от ранее разработанных, учтены размер пор в мембране и мембранный потенциал. Математическое описание процесса основано на уравнении гидродинамики движения раствора и уравнении конвективной диффузии в канале, образованном двумя мембранами. В модели приняты допущения: скорость электродных реакций намного выше скорости массопереноса, поток жидкости стационарен, режим течения жидкости ламинарный, микропотоки учитываются через коэффициент задержания.

Уточненные уравнения математической модели:

1. Коэффициент диффузионной проницаемости учитывается при определении коэффициента задержания мембраны:

$$K = 1 - \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{k_4 k_p} - 1 \right) \left[1 - \exp \left(- \frac{k_5 J k_p i \eta}{P i \eta + M_{эд}} \right) \right] \exp(-k_6 J)}, \quad (14)$$

где $P = \frac{\ln \frac{\varphi_1}{\varphi_2}}{t - \tau}$ — коэффициент диффузионной проницаемости.

2. Радиус пор мембраны учитывается в электроосмотическом потоке для прикатодной и прианодной мембран, который используется в формуле для расчета удельного потока через прикатодную и прианодную мембраны:

$$J = k\Delta P \pm V_{\text{эо1,2}}, \quad (15)$$

где $V_{\text{эо1,2}} = \pm \frac{\varepsilon \xi \zeta F_m i}{4\pi\mu\chi}$ – электроосмотический поток для прикатодной и прианодной мембран.

Уравнения для определения продольной и поперечной скоростей обозначим:

$$f_1(x) = k\Delta P \pm \left(\frac{\varepsilon \xi \zeta F_m i}{4\pi\mu\chi} \right); \quad f_2(x, y) = \frac{1}{2\mu} \left(\frac{\partial P}{\partial x} \right) (R^2 - y^2). \quad (16)$$

Получим следующую систему уравнений, решением которой является распределение поля концентрации вещества в межмембранном канале:

$$\begin{cases} f_2(x, y) \frac{\partial C}{\partial x} + f_1(x) \frac{\partial C}{\partial y} = D \frac{\partial^2 C}{\partial y^2}; \\ C(0, y) = C_{\text{исх}}; \\ K_1 C(x, R) V(x, R) = D \frac{\partial C(x, R)}{\partial y}; \\ K_2 C(x, -R) V(x, -R) = D \frac{\partial C(x, -R)}{\partial y}. \end{cases} \quad (17)$$

Для проверки адекватности математической модели массопереноса в электроультрафильтрационных аппаратах произвели расчет изменения коэффициента задержания на выходе из аппарата и сравнение с экспериментальными данными (рис. 11).

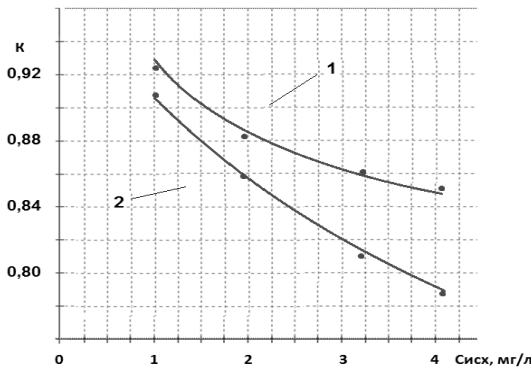


Рис. 11. Сравнение экспериментальных и расчетных данных по коэффициенту задержания: 1 – УПМ-К, 2 – УАМ-150. Сплошная линия – расчет, точки – эксперимент

Пятая глава. Предложена методика расчета электроультрафильтрационного аппарата для очистки промышленных стоков и растворов. В методике расчета используется уравнение взаимосвязи коэффициента задержания и удельной производительности

$$J = J_0 \left(1 - \kappa^{(-1/K)}\right), \quad (18)$$

где κ – коэффициент концентрирования; J_0 – константа проницаемости по воде; K – коэффициент задержания.

Рабочая площадь мембраны в аппарате

$$F = V/J. \quad (19)$$

Рабочая площадь элемента определяется с учетом общей площади мембраны $F_m = a_m b_m$ по формуле

$$F_3 = 2F_m - 2 \left(\left(\pi d_{\text{пер}}^2 / 4 \right) + a \cdot b \right), \quad (20)$$

где $d_{\text{пер}}$, a , b – диаметр переточного канала, длина малой и большой полуоси эллипса.

Общее число элементов в аппарате

$$n = F/F_3. \quad (21)$$

Проверку количества элементов в электроультрафильтрационном аппарате проводим по формуле:

$$n_3 = (V - (E_d - 2E_m)) / (iF_3 R), \quad (22)$$

где E_d – сумма потенциалов разложения и перенапряжения на электродах; E_m – мембранное напряжение; R – внутреннее сопротивление аппарата.

С учетом полученной площади и числа элементов в аппарате переходим к методике расчета напряженно-деформированного состояния наиболее нагруженного элемента аппарата – крышки, выполненной из конструкционного полиамида ПА-6. Полная потенциальная энергия крышки мембранного аппарата:

$$\Pi = - \iint p(x, y) \cdot w(x, y) dx dy + V. \quad (23)$$

Целевая функция массы

$$M(h) = \sum_{i=1} M_i(\hat{h}),$$

где $\hat{h} = (h_1, h_2, \dots, h_i)$ – вектор управляемых параметров.

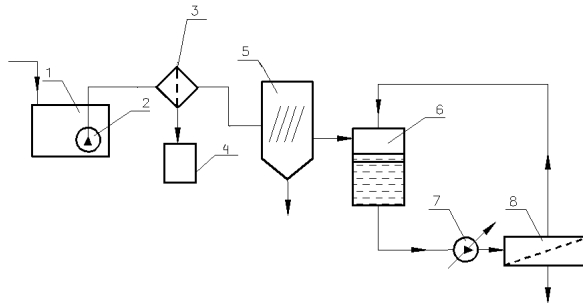


Рис. 12. Схема очистки сточных вод от АПАВ:

- 1 – исходная емкость; 2 – погружной насос; 3 – фильтр грубой очистки;
4 – шламосборник; 5 – тонкослойный отстойник; 6 – емкость с осветленной водой;
7 – насос-дозатор; 8 – электроультрафильтрационный аппарат

Ограничения:

- по прочности $\sigma_{\max}^{(i)} \leq [\sigma]_i, (i = 1, 2, 3, \dots);$
- по жесткости $f_{\max}^{(i)} \leq [f]_i;$
- по геометрическим параметрам $h_{i \min} \leq h_i \leq h_{i \max}.$

При оптимизации целевой функции массы используется математический аппарат МШФ (метод штрафных функций).

Далее рассмотрен вопрос практического применения исследуемого электроультрафильтрационного метода для очистки сточных вод от анионных поверхностно-активных веществ. Предложена модифицированная схема с электроультрафильтрационным аппаратом для ОАО «Кирсановский завод текстильного машиностроения» (рис. 12).

Включение стадии электроультрафильтрационной очистки сточных вод ОАО «Кирсановский завод текстильного машиностроения» позволит повысить качество очистки, снизив содержание АПАВ в 6–7 раз.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Обобщены литературные данные по существующим методам разделения растворов и определены область применения, преимущества и недостатки известных методов. Выполненный литературный обзор позволил сформулировать цель и задачи исследуемой работы.

2. Разработаны конструкция ячейки и методики проведения экспериментальных исследований по определению радиусов пор мембран и мембранного потенциала. Предложены уравнения для расчета радиусов пор, мембранного потенциала и диффузионной проницаемости мембран.

3. Получены экспериментальные данные по радиусу пор мембран, мембранному потенциалу, коэффициенту задержания, удельному потоку растворителя и коэффициенту распределения в зависимости от концентрации раствора, давления, силы тока и типа мембраны. Получены численные значения эмпирических коэффициентов для теоретического расчета кинетических коэффициентов массопереноса в полупроницаемых мембранах для водного раствора АПАВ.

4. На основе проведенных экспериментальных исследований уточнена математическая модель массопереноса в электроультрафильтрационных аппаратах посредством учета радиуса пор мембраны и мембранного потенциала, что позволяет получать уточненные значения концентрации веществ в пермеате и коэффициента задержания. Проверена адекватность математической модели сравнением экспериментальных и расчетных данных по коэффициенту задержания.

5. Предложена инженерная методика и программа для ЭВМ (св-во о рег. № 2012616716), которая позволяет определять геометрические параметры и рабочую площадь трубчатого электробаромембранного аппарата.

6. Предложена методика расчета корпуса электробаромембранного аппарата на прочность и жесткость, позволяющая определить рациональные конструктивные параметры элементов, работающих под высоким давлением, в результате использования которой масса аппарата снижается на 25%.

7. Разработана и предложена к внедрению в ОАО «Кирсановский завод текстильного машиностроения» схема очистки сточных вод от анионных поверхностно-активных веществ, включающая в себя электроультрафильтрационный аппарат и позволяющая очищать стоки до предельно допустимых концентраций. Ожидаемый экономический эффект от внедрения данной схемы очистки составляет 200 тыс. р. в год в ценах 2014 г.

ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

ΔP – рабочее давление, Па; T – температура раствора, К; J – удельный поток растворителя, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$; K – коэффициент задержания мембран; U, V – продольная и поперечная скорость раствора, м/с; k – коэффициент водопроницаемости мембраны, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{Па} \cdot \text{с})$; F_m – рабочая площадь мембраны, м^2 ; μ – коэффициенты динамической вязкости раствора, Па·с; ζ – электрический потенциал, В; ϵ, μ, χ – соответственно диэлектрическая проницаемость, динамическая вязкость и электропроводность раствора; ς – пористость мембраны; $V_{\text{зо}}, M_{\text{эд}}$ – электроосмотический и электродиффузионный потоки, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$; ϕ – мембранный потенциал, мВ; i – плотность тока, А/м²; АПАВ – анионные поверхностно-активные вещества; ЭВМ – электронная вычислительная машина; ПДК – предельно допустимая концентрация.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ИЗЛОЖЕНО

в периодических изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Исследование электрокинетических характеристик обратноосмотических мембран в водных растворах гидрокарбоната натрия / Ю. М. Головин, И. П. Мицул, Д. О. Никитенков, В. М. Поликарпов, С. И. Лазарев, И. В. Хорохорина, В. Н. Холодильник // Сорбционные и хроматографические процессы. – 2014. – Т. 14, вып. 3. – С. 530 – 536.

2. Котельникова (Хорохорина), И. В. Влияние методов обработки на эффективность обратноосмотической очистки от анилина промышленных растворов и стоков / И. В. Котельникова (Хорохорина), С. И. Лазарев // Известия вузов. Химия и химическая технология. – 2013. – Т. 56, № 9. – С. 57 – 59.

3. Исследование осмотической проницаемости мембран в водном растворе сульфата железа / С. В. Ковалев, И. В. Котельникова (Хорохорина), К. С. Лазарев, М. С. Селезнева // Известия вузов. Химия и химическая технология. – 2012. – Т. 55, вып. 1. – С. 89 – 97.

4. Сравнительный анализ исследования напряженно-деформированного состояния в элементах конструкции электробаромембранного аппарата плоскокамерного типа / И. В. Котельникова (Хорохорина), В. Ю. Попов, В. И. Кочетов, С. И. Лазарев // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. – 2011. – Вып. 5. – С. 1279 – 1281.

5. Котельникова (Хорохорина), И. В. Исследование кинетических характеристик мембранного разделения растворов, содержащих поверхностно-активные вещества и нефтепродукты / И. В. Котельникова (Хорохорина), В. Л. Головашин, С. И. Лазарев // Вестник Тамбовского университета. Серия : Естественные и технические науки. – 2012. – Вып. 2. – С. 685 – 687.

6. Экспериментальные и теоретические исследования структуры поверхности полупроницаемых обратноосмотических мембран методом рентгеновского рассеивания / С. И. Лазарев, В. С. Быстрицкий, Ю. М. Головин, В. Н. Холодилин, И. В. Котельникова (Хорохорина), В. М. Поликарпов // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. – 2012. – Вып. 4. – С. 1260 – 1262.

7. Применение электробаромембранного аппарата трубчатого типа в процессе очистки и утилизации сточных вод / С. И. Лазарев, И. В. Котельникова (Хорохорина), А. А. Лавренченко, В. Л. Головашин // Наука и бизнес: пути развития. – 2012. – Т. 16, вып. 4. – С. 45 – 47.

8. Лазарев, С. И. Электроультрафильтрационное извлечение анилина и морфолина из промышленных растворов и стоков / С. И. Лазарев, И. В. Котельникова (Хорохорина), М. А. Костылева // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. – 2013. – Вып. 4. – С. 1449 – 1450.

9. Головашин, В. Л. Ультрафильтрационное разделение фосфатсодержащих растворов на мембране УПМ-100 / В. Л. Головашин, С. И. Лазарев, И. В. Котельникова (Хорохорина) // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. – 2013. – Вып. 4. – С. 1461 – 1462.

10. Оптимизация конструктивных элементов электробаромембранного аппарата плоскокамерного типа / В. Ю. Попов, В. И. Кочетов, С. И. Лазарев, И. В. Котельникова (Хорохорина) // Прогресивні технології та системи машинобудування. – Украина, 2013. – Вип. 1, 2 (45). – С. 217 – 220.

в материалах научных конференций:

11. Kotelnikova (Khorokhorina), I. Caulations of electrobaromembrane apparatus of flat chamber type / I. Kotelnikova (Khorokhorina), V. Kochetov, S. Lazarev // International conference «Ion transport in organic and inorganic membranes». – Krasnodar, 2011. – P. 98 – 100.

12. Исследование напряженно-деформированного состояния в элементах конструкции электромембранного аппарата плоскокамерного типа / В. Ю. Попов, В. И. Кочетов, С. И. Лазарев, И. В. Котельникова (Хорохорина) // Решение региональных экологических проблем : материалы международной научно-практической конференции. – Тамбов, 2011. – С. 91 – 95.

13. Котельникова (Хорохорина), И. В. Ультрафильтрационная очистка токсичных сточных вод агропромышленных производств / И. В. Котельникова (Хорохорина), С. И. Лазарев, В. Л. Головашин // Повышение эффективности использования ресурсов при производстве сельскохозяйственной продукции – новые технологии и техника нового поколения для растениеводства и животноводства : сборник научных докладов XVI Международной научно-практической конференции. – Тамбов, 2011. – С. 247 – 249.

14. Котельникова (Хорохорина), И. В. Технологическая схема очистки сточных вод нефтеперерабатывающих заводов / И. В. Котельникова (Хорохорина), В. Л. Головашин, С. И. Лазарев // Перспективные разработки науки и техники : сборник докладов международной конференции. – Польша, 2011. – С. 65 – 68.

15. Котельникова (Хорохорина), И. В. Исследование электробаромембранного аппарата в процессах очистки и утилизации промышленных растворов / И. В. Котельникова (Хорохорина), В. Л. Головашин, А. М. Воробьев // Инноваци-

онные проекты в области агроинженерии : материалы международной научно-практической конференции. – Москва, 2012. – С. 61 – 64.

16. Котельникова (Хорохорина), И. В. Ультрафильтрационная очистка промышленных растворов автомоечных станций / И. В. Котельникова (Хорохорина), А. Е. Позднякова // Аспекты техносферной безопасности в приоритетных направлениях деятельности человека : материалы международной научно-практической конференции. – Тамбов, 2012. – С. 87 – 89.

17. Лазарев, С. И. Разработка конструкции электробаромембранного аппарата / С. И. Лазарев, И. В. Котельникова (Хорохорина), В. Л. Головашин // Дни науки-2012 : материалы 8-й Международной научно-практической конференции. – Прага, 2012. – С. 51–52.

18. Головашин, В. Л. Технологическая схема очистки сточных вод нефтеперерабатывающих заводов / В. Л. Головашин, И. В. Котельникова (Хорохорина), С. И. Лазарев // Ключевые аспекты научной деятельности : материалы 8-й Международной научно-практической конференции. – Польша, 2012. – С. 32 – 34.

19. Очистка сточных вод пищевых предприятий от маслосодержащих компонентов / С. И. Лазарев, В. Л. Головашин, А. Е. Позднякова, И. В. Котельникова (Хорохорина), В. Г. Мирончук, Ю. Г. Змиевский // Материалы 78-й Научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов. – Киев, 2012. – С. 71–72.

20. Котельникова (Хорохорина), И. В. Исследование кинетических характеристик мембранного разделения растворов, содержащих поверхностно-активные вещества / И. В. Котельникова (Хорохорина), М. А. Костылева // Наука и образование для устойчивого развития экономики, природы и общества : сборник материалов международной научной конференции им. В. И. Вернадского. – Тамбов, 2013. – С. 95 – 98.

21. Хорохорина, И. В. Сорбция анионных поверхностно-активных веществ из водного раствора / И. В. Хорохорина, С. И. Лазарев // Иониты-2014 : сборник материалов XIV конференции с международным участием. – Воронеж, 2014. – С. 327–328.

Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ:

22. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012616716. Расчет конструктивных параметров трубчатого электробаромембранного аппарата / В. Л. Головашин, С. И. Лазарев, И. В. Котельникова (Хорохорина), С. А. Вязовов. – 26.07.2012.

Подписано в печать 28.10.2014.
Формат 60 × 84 /16. 0,93 усл. печ. л. Тираж 100 экз. Заказ № 499

Издательско-полиграфический центр ФГБОУ ВПО «ТГТУ»
392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106, к. 14
Тел. 8(4752) 63-81-08. E-mail: izdatelstvo@admin.tstu.ru