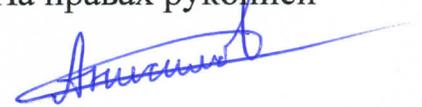


На правах рукописи



Анисимов Сергей Игоревич

**ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ
СИСТЕМ ВОДОПОДГОТОВКИ НА ОСНОВЕ
ОБРАТНОГО ОСМОСА**

05.17.18 – Мембраны и мембранная технология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2018

Работа выполнена на кафедре мембранной технологии Российского химико-технологического университета имени Д. И. Менделеева

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор
Орлов Николай Савельевич,
профессор кафедры мембранной
технологии Российского химико-
технологического университета имени
Д. И. Менделеева.

Официальные оппоненты:

доктор химических наук, профессор,
Волков Владимир Васильевич,
заведующий лаборатории №18
«Полимерных мембран» института
нефтехимического синтеза им. А.В.
Топчиева Российской академии наук,
кандидат технических наук,
Андрианов Алексей Петрович,
доцент кафедры «Водоснабжение и
водоотведение» Национального
исследовательского Московского
государственного строительного
университета,

Ведущая организация:

**ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина»**

Защита состоится «20» декабря 2018г.

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-библиотечном центре
РХТУ им. Д. И. Менделеева и на сайте <http://diss.muctr.ru/author/258/>

Автореферат диссертации разослан «__» _____ 2018г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

Д 212.204.06



В.Т. Новиков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность:

В последние годы в нашей стране обратный осмос (ОО) широко применение в качестве основной стадии деминерализации в системах подготовки воды, используемой в медицине, фармацевтике, теплоэнергетике, микроэлектронике и других отраслях промышленности. Другой важной сферой применения ОО, широко распространенной в мировой практике, является опреснение морской воды. Создание ОО опреснительных станций и систем подготовки деминерализованной воды большой единичной мощности сопряжено со значительными капитальными и энергетическими затратами. Поэтому, разработка метода технико-экономической оптимизации (ТЭО) таких систем является актуальной задачей.

Метод ТЭО направлен на поиск структурной организации и выбор режимов эксплуатации систем водоподготовки, обеспечивающих минимальную себестоимость очищенной воды на основе анализа затрат на реализацию и эксплуатацию в зависимости от состава питающей воды, требований к качеству очищенной воды, региональных тарифов на электроэнергию, потребленную и отведенную воду, а также специфических требований к исполнению оборудования в зависимости от сферы применения.

При проектировании систем водоподготовки, наибольшее внимание необходимо уделять ТЭО стадии ОО, поскольку, именно она, посредством требований к расходу и качеству подаваемой на нее воды, (обобщенно характеризуемому индексами коллоидным и Ланжелье), обуславливает перечень методов, состав и габариты оборудования и стадии предварительной очистки, а, следовательно, капитальные и энергетические затраты всей системы в целом. Поэтому, разработка ТЭО систем водоподготовки, основное внимание в которой уделяется стадии ОО, является актуальной задачей.

Метод ТЭО базируется на математической модели процесса ОО, основу которой составляют уравнения переноса воды и электролитов через мембрану. Результаты расчетов удельной производительности мембран, основанные на уравнениях переноса воды, подтверждаются на практике. Наибольшую сложность представляет уравнение переноса электролитов, необходимое для расчета

селективности мембраны. Из практики эксплуатации известно, что селективность ОО мембран резко снижается в области высоких - более 500 моль/м³, и низких - менее 1 моль/м³, концентраций. В первом случае это объясняется достижением границы дальней гидратации электролита, а во втором случае причины аномального поведения селективности не ясны. Поэтому, исследование переноса электролитов через ОО мембрану в области разбавленных растворов электролитов, с целью обоснования предела осуществления процесса ОО, представляет научный и практический интерес.

Фирмы-производители мембранных элементов сопровождают свою продукцию компьютерными программами для расчета систем обратного осмоса. Однако, в области разбавленных растворов результаты их расчета зачастую не соответствуют практическим данным. Кроме того, уравнения переноса электролита через мембрану в описании этих программ не приводятся, следовательно, оценить достоверность результатов расчета селективности мембраны на стадии проектирования не представляется возможным.

Цель работы: Техничко-экономическая оптимизация систем водоподготовки на основе обратного осмоса.

Для достижения цели работы необходимо решить следующие **задачи**:

1. Исследовать особенности массопереноса электролитов через обратноосмотическую мембрану в области низких концентраций разделяемого раствора.

2. Скорректировать математическую модель обратного осмоса с целью обеспечения адекватности результатов расчета селективности мембран в области низких концентраций.

3. Разработать метод технико-экономической оптимизации систем водоподготовки на основе обратного осмоса.

4. Реализовать метод технико-экономической оптимизации в виде компьютерной программы.

Научная новизна результатов диссертационной работы заключается в следующих положениях и обобщениях:

1. Определен нижний предел осуществления процесса обратного осмоса, характеризующийся концентрацией $C_{S3i}^{R \rightarrow 0}$ для индивидуального электролита у поверхности композитной полиамидной мембраны, при которой ее селективность стремится к нулю. Концентрация $C_{S3i}^{R \rightarrow 0}$ выражена в виде зависимости $C_{S3i}^{R \rightarrow 0} = CM/(J_V \cdot \Sigma n_{wi})$, от суммы чисел гидратации Σn_{wi} катионов и анионов данного сорта электролита и объемного потока пермеата J_V . Константа CM характеризует селективные свойства мембраны.

2. Предложено математическое описание обратного осмоса на основе уравнений модели «растворение-диффузия». Уравнение переноса ионов было дополнено аддитивной составляющей, которая характеризуется свойствами мембраны и суммой чисел гидратации катиона и аниона электролита. Предложенная система уравнений позволяет рассчитывать селективность при разделении многокомпонентных разбавленных растворов электролитов.

3. Метод технико-экономической оптимизации систем водоподготовки на основе обратного осмоса, направленный на обеспечение минимальной себестоимости очищенной воды, развит за счет перехода от монокритериальной к многокритериальной задаче оптимизации, решение которой осуществляется лексикографическим методом.

Практическая значимость

1. Разработан действующий прототип компьютерной программы технико-экономической оптимизации систем водоподготовки на основе обратного осмоса, базирующийся на предложенном методе технико-экономической оптимизации. Программа осуществляет поиск оптимальной структурной организации и режимов эксплуатации стадии обратного осмоса по заданному ионному составу питающей воды, требованиям к производительности, а также качеству пермеата и ретаната.

2. Апробация программы осуществлялась на примере оценочного расчета варианта станции опреснения прибрежных вод на основе обратного осмоса для обеспечения питьевой водой населения города Евпатория численностью 120 тысяч

человек. Себестоимость опресненной воды при среднесуточном тарифе на электроэнергию 3,8 руб./КВт·час составила 38 руб/м³, при генерации энергии электростанцией на основе фотоэлементов и ветрогенератора – 148 руб/м³.

3. Изготовлены и внедрены три мобильные установки (комплекс КВ-0,06 ВО) подготовки деминерализованной воды для гемодиализа, при расчете и проектировании, которых использовалась скорректированная математическая модель обратного осмоса. В настоящий момент установки эксплуатируются на следующих объектах: КОГБУЗ «Кировская областная клиническая больница» г. Киров, КОГБУЗ «Омутнинская ЦРБ», г. Омутнинск.

Апробация работы: Основные положения и результаты исследований опубликованы в 5 печатных изданиях, 2 из которых включены в список рецензируемых изданий ВАК. Материалы диссертации были представлены и обсуждены на XX и XXI Научно-практических конференциях «Мембранные беседы» 2016 и 2017 г.

Личный вклад автора в работу состоит в разработке и сборке лабораторной установки, самостоятельном проведении экспериментов по исследованию массопереноса, обработке и интерпретации полученных результатов, разработке метода технико-экономической оптимизации и его реализации в виде компьютерной программы, непосредственном участии в подготовке публикаций.

Структура диссертации: Работа состоит из введения, обзора литературы, экспериментальной части, обсуждений результатов, глав, посвященных разработке математической модели и метода технико-экономической оптимизации систем водоподготовки на основе обратного осмоса, их практического применения, выводов, списка литературы и приложений. Объем работы составляет 132 страницы машинописного текста, в том числе 45 рисунков, 10 таблиц, 112 уравнений.

На защиту выносятся следующие основные положения:

1. Уравнение расчета концентрации электролита у поверхности мембраны, при которой ее селективность стремится к нулю, что является пределом осуществления процесса обратного осмоса.

2. Уравнение переноса электролита через обратноосмотическую мембрану, позволяющее количественно рассчитать ее селективность при деминерализации многокомпонентных разбавленных растворов электролитов.

3. Метод многокритериальной технико-экономической оптимизации систем водоподготовки на основе обратного осмоса, реализованный в виде действующего прототипа компьютерной программы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение. Обоснована актуальность ТЭО систем водоподготовки на основе ОО, сформулированы цель и задачи исследования, определена научная новизна и практическая значимость результатов работы, приведены основные положения исследования, выносимые на защиту.

Глава 1. Обзор литературы

В данной главе представлены методы оптимизации ОО. Кратко изложены результаты современных исследований структуры и свойств композитных ОО мембран. Приведены критериальные уравнения массоотдачи во внешнедиффузионной области. Рассмотрены математические модели переноса воды и электролитов через мембрану, их достоинства и недостатки. Значительное внимание уделено исследованиям, посвященным влиянию концентрации электролитов на селективность ОО мембран.

В результате обзора литературы были сформулированы цель и задачи исследования.

Глава 2. Методическая часть

В главе приведена схема лабораторной установки для исследования массопереноса через обратноосмотические мембраны в области низких концентраций водных растворов электролитов. Для устранения влияния растворенных газов на селективность мембраны, циркуляционная емкость была оснащена устройствами барботажа и поддержания атмосферы инертного газа (аргона) над уровнем питающего раствора.

Для приготовления растворов электролитов использовалась деионизованная вода с удельным электрическим сопротивлением не менее 5 МОм·см. Анализ концентраций

ионов в растворах осуществлялся методами прямой потенциометрии (Na^+ , Ca^{2+} , NO_3^- , Cl^- , pH), трилометрического индикаторного титрования (Mg^{2+}), турбодиметрии с барием (SO_4^{2-}), атомоно-абсорбционной спектрофотометрией (ААС) пламени (Na^+ и Mg^{2+}), ААС с электротермической атомизацией (Fe^{3+}) (Анализ выполнен в ЦКП РХТУ им. Д.И. Менделеева).

В экспериментах измерялись объемные расходы пермеата P и ретанта W , концентрации ионов в пермеате C_{S2i} , ретанте C_{SWi} , и питающем растворе C_{SFi} . Объемный расход питающей воды F и доля отбора пермеата $\theta=P/F$ рассчитывались из уравнения материального баланса $F=P+W$. Концентрация ионов в разделяемом растворе C_{Sli} рассчитывалась, как среднее арифметическое значений C_{SFi} и C_{SWi} , а концентрация электролита у поверхности мембраны C_{S3i} по уравнениям:

$$C_{S3i} = C_{Sli} \cdot \text{Exp}(J_V / \beta_i), \quad (1)$$

$$\beta_i = Sh \cdot D_i / d_{\text{э}}, \quad (2)$$

$$Sh = A \cdot Re^m \cdot Sc^n, \quad (3)$$

где: J_V – удельная производительность мембраны ($\text{м}^3/(\text{м}^2\text{с})$); β_i – коэффициент массоотдачи (м/с); D_i – коэффициент диффузии электролита ($\text{м}^2/\text{с}$); $d_{\text{э}}$ – эквивалентный диаметр напорного канала (м); Sh - критерий Шервуда; $Re = \omega \cdot d_{\text{э}} / \nu$ - критерий Рейнольдса; $Sc = \nu / D$ - критерий Шмидта; ω – средняя скорость потока в напорном канале (м/с); ν – кинематическая вязкость разделяемого раствора ($\text{м}^2/\text{с}$); A , m , n – коэффициенты критериального уравнения.

Поток i -го электролита через мембрану J_{Si} (моль/ $(\text{м}^2\text{с})$) и истинная селективность R_{Hi} рассчитывались по уравнениям:

$$J_{Si} = C_{S2i} \cdot P / F_M, \quad (4)$$

$$R_{Hi} = 1 - \frac{C_{S2i}}{C_{S3i}} = 1 - \frac{1}{J_V} \cdot \frac{J_{Si}}{C_{S3i}}. \quad (5)$$

Для описания разделяющей способности мембраны использовался коэффициент массопереноса электролита, K_{Si} , который связывает поток J_{Si} электролита с движущей силой в виде разности концентраций C_{S3i} у поверхности мембраны и C_{S2i} в пермеате.

$$J_{Si} = K_{Si} (C_{S3i} - C_{S2i}). \quad (6)$$

Коэффициент массопереноса K_{Si} зависит от свойств мембраны, сорта и концентрации электролита в разделяемом растворе, а также, является функцией давления и температуры. Он рассчитывается из уравнения (6) по экспериментальным значениям J_{Si} , C_{S2i} и концентрации C_{S3i} определенной из уравнений (1) – (3).

Для снижения неравномерности распределения концентраций C_{S1i} по длине напорного канала и C_{S3i} , эксперименты проводились при малой доле отбора $\theta = P/F < 0,1$.

Глава 3. Обсуждение результатов экспериментов

Из рисунка 1 следует, что задерживающая способность обратноосмотической полиамидной мембраны резко снижается в области низких концентраций электролитов.

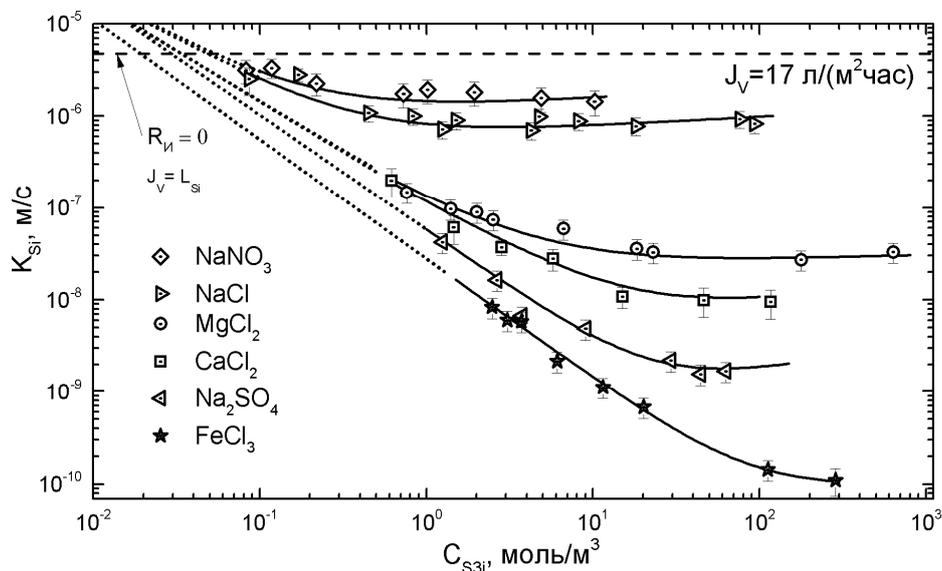


Рисунок 1. Влияние концентрации индивидуальных электролитов в разделяемом растворе на коэффициенты массопереноса K_{Si} . Мембранный элемент TW30 1812-75, температура $t=25^\circ\text{C}$, доля отбора $\theta=P/F < 0,1$ при постоянной удельной производительности и $\text{pH}=7$.

Из анализа экстраполяций зависимостей, приведенных на рисунке 1, в области низких концентраций, следует, что произведение мольного потока электролита J_{Si} на сумму чисел гидратации его катионов и анионов $\sum n_{wi}$ есть величина постоянная и не зависит от сорта электролита. В результате, в области низких концентраций разделяемого раствора поток i -го электролита был представлен в виде:

$$J_{Si} = CM / \sum n_{wi} \quad (7)$$

где, $CM = 3,5 \cdot 10^{-6}$ (моль $H_2O/(m^2c)$) – постоянная величина, характеризующая селективные свойства мембраны TW30. Для электролитов, состоящих из одновалентных ионов, уравнение соблюдается в области $C_{S3i} < 0,2$ моль/ m^3 , а для электролитов, содержащих двух- и трехвалентные ионы – в области $C_{S3i} < 2$ моль/ m^3 .

Подстановка (7) в (5) позволила получить уравнение для расчета концентрации $C_{S3i}^{R \rightarrow 0}$ электролита у поверхности мембраны, при которой истинная селективность стремится к нулю ($R_{H_i} \rightarrow 0$), что определяет предел осуществления процесса ОО.

$$C_{S3i}^{R \rightarrow 0} = CM / (J_V \Sigma n_{wi}). \quad (8)$$

Для оценки фактора, обуславливающего снижение селективности полиамидной ОО мембраны в разбавленных растворах электролитов, J_{Si} был представлен в виде суммы диффузионного J_{Si}^D и конвективного J_{Si}^K потоков, которые пропорциональны соответствующим движущим силам:

$$J_{Si} = J_{Si}^D + J_{Si}^K = K_{Si}^D \cdot (C_{S3i} - C_{S2i}) + K_{Si}^K (\Delta p - \Delta \pi) \quad (9)$$

где: K_{Si}^D , K_{Si}^K – коэффициенты массопереноса диффузионного (м/с) и конвективного (моль/($m^2c \cdot Pa$)) потоков, соответственно; Δp и $\Delta \pi$ – разность гидростатических и осмотических давлений в разделяемом растворе у поверхности мембраны и в пермеате, соответственно.

Анализ соответствия уравнения (9) экспериментальным данным осуществлялся аппроксимацией линейных зависимостей, приведенных на рисунке 2, уравнением $y = k \cdot x + b$. В результате было установлено, что $K_{Si}^K = const \cdot C_{S3i}$ (рисунок 2б), а смещение по оси ординат функции $J_{Si}^D = f(C_{S3i})$ (рисунок 2в), не характерное для диффузионного потока электролита, отражает наличие некоего дополнительного потока J_{Si}^F (моль/(m^2c)), постоянного в области исследуемых концентраций C_{S3i} . Поток J_{Si}^F не зависит, как от $(\Delta p - \Delta \pi)$, так и от $(C_{S3i} - C_{S2i})$, его вклад в J_{Si} при концентрации, превышающей 10-15 моль/ m^3 , незначителен, но становится определяющим при $C_{S3i} < 5$ моль/ m^3 .

На основании вышеизложенного, уравнение (9) было преобразовано к виду:

$$J_{Si} = J_{Si}^D + J_{Si}^K + J_{Si}^F = K_{Si}^D \cdot (C_{S3i} - C_{S2i}) + const \cdot C_{S3i} (\Delta p - \Delta \pi) + CM / \Sigma n_{wi}, \quad (10)$$

где $J_{Si}^F = CM / \Sigma n_{wi}$ что следует уравнения (7), при $C_{S3i} \rightarrow 0$.

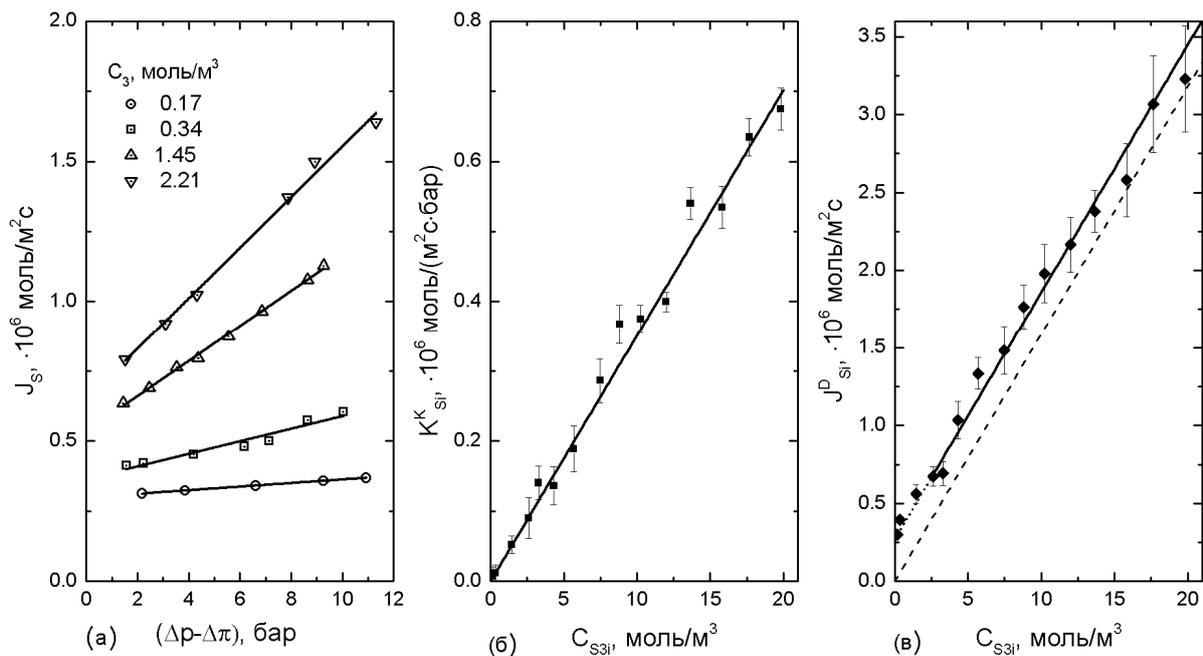


Рисунок 2. Анализ влияния движущих сил на перенос электролита через мембрану (модуль TW30 1812-75) при: $t=25$ °C; $pH=7$; (а) – зависимость потока NaCl от движущей силы $(\Delta p - \Delta \pi)$; (б) – зависимость коэффициента массопереноса конвективного потока NaCl от концентрации C_{S3i} ; (в) – зависимость диффузионного потока NaCl от концентрации C_{S3i} .

Произведена оценка энергии активации потока J_{Si}^F при разделении растворов NaCl различных концентраций по температурным зависимостям в координатах $\ln(J_{Si}) - 1/RT$.

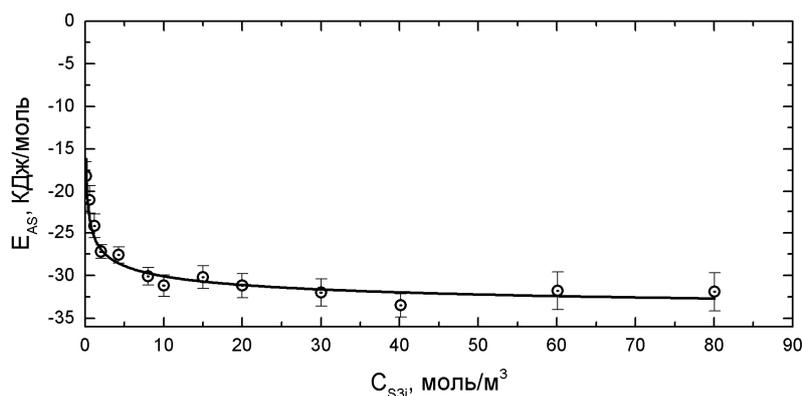


Рисунок 3. Зависимость энергии активации потока NaCl через мембрану (модуль TW30 1812-75) от концентрации C_{S3i} при: $pH = 7$; $C_3/C_1 < 1.1$; $J_V = 17$ л/(м²час), в диапазоне температур 13-35 °C.

Из рисунка 3 следует, что энергия активации E_{AS} при концентрации $C_{S3i} \rightarrow 0$ равна -18 КДж/моль, а при $C_{S3i} = 10-80$ моль/м³, соответственно, -32 КДж/моль. Различие энергий активации свидетельствует об изменении механизма переноса электролита в области разбавленных растворов.

Обоснованием потока J_{Si}^F может служить следующая гипотеза. В полимере селективного слоя ОО мембраны присутствует несвязанная вода, которая не входит в гидратную оболочку полимерных цепей, но, проникает в свободный объем полимера за счет прямого осмоса. Присутствие такой воды в гидрофильных сшитых полимерах косвенно подтверждается эффектом Шредера. Перенос ионов, замещающих несвязанную воду, осуществляется за счет теплового движения цепей полимера. Поэтому, поток электролита J_{Si}^F численно равен постоянному потоку несвязанной воды - CM (моль $H_2O/(m^2c)$), отнесенному к числу молекул воды в гидратных оболочках ионов данного электролита $\sum n_{wi}$ (моль $H_2O/$ моль эл-та).

Глава 4. Математическая модель процесса обратного осмоса

Математическое описание массопереноса воды и ионов электролитов через ОО мембрану на уровне элементарного объема мембранного аппарата, основанное на модели «растворение-диффузия», представлено системой уравнений:

$$J_V = \eta_{FW} K_P^T (\Delta p - \Delta \pi) \quad (11)$$

$$\eta_{FW} = 1 - 1/\tilde{V}_W \sum_{i=1}^k (C_{S3i} \cdot n_{wi}) \quad (12)$$

$$K_P^T = K_P^{298} \exp\left(\frac{E_{AW}}{RT} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{298}\right)\right) \quad (13)$$

$$J_{Si} = J_{Si}^r + J_{Si}^f \quad (14)$$

$$J_{Si}^r = \frac{m_i D_i}{\delta} (C_{S3i} - C_{S2i}) \quad (15)$$

$$J_{Si}^f = CM \cdot C_{S3i} / \sum_{i=1}^k (n_{wi} C_{S3i}) \quad (16)$$

$$m_i = \exp\left(\frac{\Delta \Delta G_{Si}}{RT} - z_i \Delta \psi + \frac{\nu \Delta p}{RT}\right) \quad (17)$$

$$\Delta \Delta G_{Si} = \left(\frac{(z_i e)^2 N_A}{8\pi \epsilon_0 r_{Hi}}\right) \left(\frac{1}{\epsilon'} - \frac{1}{\epsilon}\right) \quad (18)$$

$$\sum_{i=1}^k J_{Si} z_i = 0 \quad (19)$$

Где: η_{FW} – доля свободной воды в разделяемом растворе у поверхности мембраны; \tilde{V}_w – мольный объем воды [м³/моль]; K_P^T и K_P^{298} – коэффициент гидравлической проницаемости при температуре T и 298 К соответственно [м/(с·Па)]; E_{AW} – энергия активации потока воды [Дж/моль]; J_{Si} , J^F_{Si} , J^S_{Si} – мольные потоки ионов i -го вида: суммарный, через связанную и несвязанную воду соответственно [моль экв./(м²с)]; m_i – коэф. распределения между разделяемым раствором и фазой связанной с мембраной воды; δ - толщина селективного слоя мембраны (~20нм) [м]; CM – поток несвязанной воды в полимере [моль/м²с]; $\Delta\Delta G_{Si}$ - изменение энергии Гиббса гидратации иона при переходе в фазу связанной воды [Дж/моль]; z_i - зарядовое число иона; $\Delta\Psi$ - безразмерный электростатический потенциал мембраны; ν - коэффициент влияния давления на свободную энергию иона в мембране [м³/моль]; ε_0 , ε , ε' - диэлектрические проницаемости вакуума, связанной воды и раствора соответственно; r_{Hi} - радиус гидратированного иона.

Корректировка уравнений переноса воды и электролита через ОО мембрану осуществлялась с учетом аномального снижения селективности в области низких и высоких концентраций. Уравнение переноса растворителя (11) дополнено долей свободной воды в разделяемом растворе по методу, описанному в работах Кочарова и Дытнерского (12). Уравнение переноса ионов (14) дополнено потоком J^F_{Si} (16). Коэффициенты распределения электролита между фазами разделяемого раствора и мембраны рассчитываются через изменение энергии Гиббса гидратации проникающих ионов (17), (18). Для обеспечения условия электронейтральности (19) разделенных мембраной растворов в уравнение переноса ионов (15) и (17) введен безразмерный электрический потенциал, рассчитываемый по методу, описанному Духиным, Кочаровым и Гутиерресом.

Система уравнений (11)-(19) содержит пять констант, характеризующих мембрану. Две из них: E_{AW} и K_P^{298} рассчитываются по паспортным характеристикам, а остальные три: CM , ε' и ν – по результатам эксперимента. Значения CM , ε' и ν мембраны TW30 были определены экспериментально при разделении растворов NaCl. Адекватность модели подтверждается близким соответствием результатов расчета (рисунок 4 – линии) и эксперимента (рисунок 4 – точки).

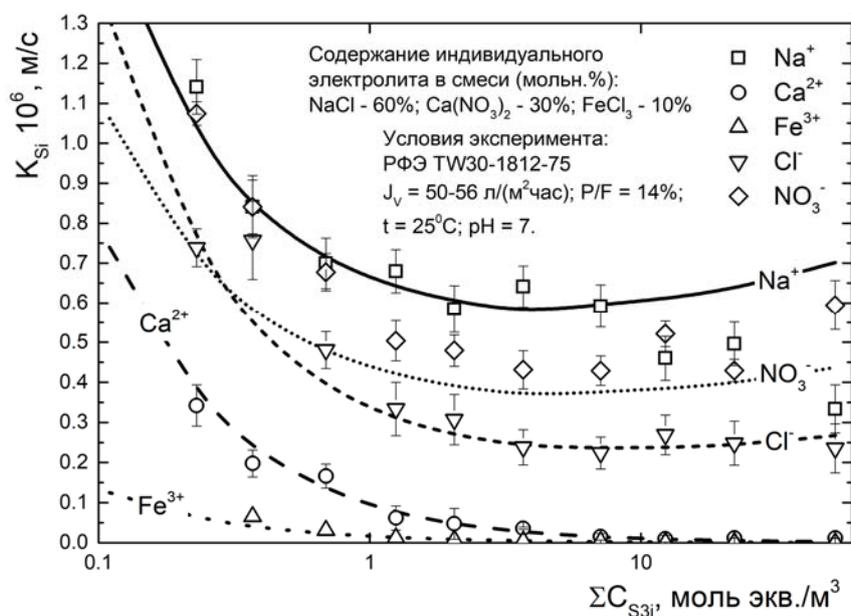


Рисунок 4. Влияние суммарной концентрации смеси электролитов в разделяемом растворе на коэффициенты массопереноса индивидуальных ионов. Сравнение экспериментальных данных – точки с результатами расчета по математической модели – линии.

Глава 5. Разработка метода технико-экономической оптимизации систем водоподготовки на основе обратного осмоса

Сформулирована задача проектирования стадии ОО систем водоподготовки:

Заданы состав примесей в исходной воде, требования к производительности и качеству пермеата, а также допустимое содержание примесей в ретанте. ТЭО направлена на поиск структурной организации и режимов эксплуатации системы водоподготовки на основе обратного осмоса. В качестве критерия оптимизации принимается себестоимость пермеата, которая рассчитывается по уравнению:

$$K_V = \frac{K_C}{P} + K'_P N + \frac{K_{ПВ}}{\theta} + K_{VP} (1/\theta - 1) \quad (20)$$

где: N - потребляемая мощность [кВт]; P - производительность пермеата [м³/час]; K_V - себестоимость пермеата [руб/м³]; K_C - коэффициент, характеризующий капитальные затраты, отнесенные ко времени эксплуатации [руб/час]; K'_P - тариф на электроэнергию [руб/кВт·час]; $K_{ПВ}$ и K_{VP} - тарифы на подведенную и отведенную воду соответственно [руб/м³].

При расчете себестоимости очищенной воды подбирается основное технологическое оборудование (насосы, корпуса аппаратов, мембранные элементы и т.д.). В процессе ТЭО стадии ОО, необходимо рассчитывать множество вариантов

компоновок. Выбор оборудования для каждого варианта требует неприемлемо больших вычислительных ресурсов.

Данная проблема была решена с помощью метода двухэтапной оптимизации, блок-схема которого приведена на рисунке 5.

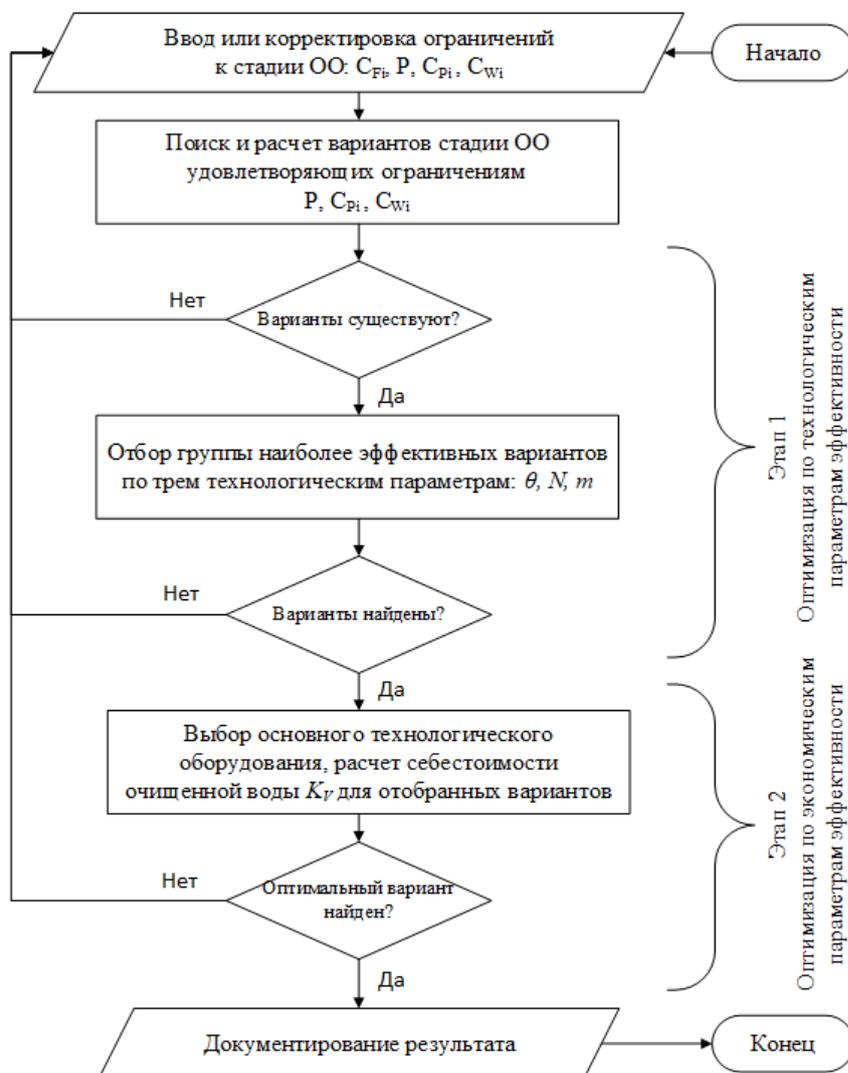


Рисунок 5. Блок-схема алгоритма ТЭО систем водоподготовки на основе ОО.

На первом этапе из множества возможных, при заданных условиях, компоновок системы ОО выбираются наиболее эффективные по трем технологическим параметрам, обуславливающим соответствующие статьи затрат: 1) капитальные – число структурных элементов (мембранных модулей, аппаратов, секций, ступеней); 2) энергетические – теоретическая мощность; 3) на водопотребление и водоотведение – доля отбора при заданной производительности. Первый этап оптимизации позволяет сократить количество вариантов стадии ОО до небольшой отобранной группы (обычно, не более 10).

На втором этапе, для каждого варианта из этой группы осуществляется выбор конкретных моделей основного технологического оборудования, расчет экономических показателей и выбор окончательного варианта стадии ОО, обеспечивающего минимальную себестоимость очищенной воды.

Предложенный метод оптимизации реализован в виде действующего прототипа компьютерной программы, которая выполнена на языке VBA Microsoft Excel.

Глава 6. Практическое применение

Разработанный метод ТЭО был использован для предпроектной проработки варианта решения задачи обеспечения питьевой водой населения г. Евпатория (численностью 120 тысяч человек) за счет строительства опреснительного завода на основе обратного осмоса. По оценке специалистов Крымводоканала, проект строительства опреснительной станции предусматривает единовременные затраты на реализацию в размере 80 млн. евро с себестоимостью опресненной воды 24 руб/м³ в ценах 2017 года.

Таблица 1. Техничко-экономические показатели системы опреснения на основе обратного осмоса с энергообеспечением за счет традиционных и возобновляемых энергоресурсов, производительностью 1000 м³/час.

	с использованием электроэнергии электросети города	с использованием энергии, генерируемой электростанцией на основе фотоэлементов и ветрогенератора
Себестоимость опресненной воды	38,3 руб/м ³	148,3 руб/м ³
Затраты на предочистку	22,4 руб/м ³	84,0 руб/м ³
Затраты на опреснение	15,9 руб/м ³	64,3 руб/м ³
Единовременные капитальные затраты	1 485 млн. руб.	
Потребляемая мощность	4,22 МВт	
Солесодержание пермеата	$C_p=397$ мг/дм ³	
Стадии предочистки	Узел водозабора с решетчатым фильтром 500 мкм, станция дозирования гипохлорита натрия, дисковые фильтры 20мкм AZUD HF 412D-HF/14FX (10 шт.), блок ультрафильтрации на основе модулей Inge DIZZER XL0.9MB90 (300 шт.), станции дозирования тиосульфата натрия, антискаланта и кислоты, емкости хранения опресненной воды 5 тыс. м ³ (2 шт), узел сброса ретанга.	
Структура стадии ОО	количество секций – 1, число аппаратов – 165, число модулей в аппарате - 8; тип мембранного элемента AG8040F-400, турбодетандер ER PX-Q300 (20 шт.)	
Режим эксплуатации стадии ОО	$t=14^{\circ}\text{C}$; $\omega=0,2$ м/с; $P/F=0,5$ $\Delta P_H=36$ ати; $E=0,0$	

Компьютерная программы использовалась в качестве инструмента экспертной оценки аванпроекта опреснительной станции на основе обратного осмоса с

производительностью 1000 м³/час, исходя из норм потребления 200 л/сутки на одного жителя. Был осуществлен выбор структурной организации и режимов эксплуатации, произведен подбор оборудования, расчет капитальных и энергетических затрат, а также себестоимости опресненной воды (см. таблицу 1).

Математическая модель ОО была использована для расчета и проектирования мобильных установок «КВ-0,06 ВО» подготовки воды для гемодиализа на основе обратного осмоса (рисунок 6). Три установки в настоящий момент эксплуатируются в отделении реанимации Кировской областной клинической больницы и в отделении гемодиализа в г. Омутнинска Кировской обл.

Характеристики пермеата, определенные при эксплуатации установки находятся в близком соответствии с расчетными значениями (таблица 2).

Таблица 2. Сравнение результатов расчета и практической эксплуатации установки КВ-0,06 ВО.



Рисунок 6. Вид установки КВ-0,06 ВО

Показатель.	Питающая вода	Пермеат	
		Расчет	Измерение
рН (г/м ³)	7.6	6.4	6.6
Щел. (г.экв/м ³)	1.2	0.1	-
Na ⁺ (г/м ³)	92	0.92	1.02
Ca ²⁺ (г/м ³)	36	0.08	0.089
Mg ²⁺ (г/м ³)	8	0.02	0.022
Cl ⁻ (г/м ³)	123	0.80	0.91
SO ₄ ²⁺ (г/м ³)	51	0.08	-
Общее солесодержание	427	2.2	2.4

Выводы:

1. В результате обработки экспериментальных данных обосновано, что снижение селективности полиамидных композитных обратноосмотических мембран в разбавленных растворах, обусловлено наличием потока электролита, который характеризуется свойствами мембраны и суммой чисел гидратации катиона и аниона данного сорта электролита $J_{Si}^F = CM / \sum n_{wi}$.

2. Предложено математическое описание обратного осмоса на основе уравнений модели «растворение-диффузия». Уравнение переноса ионов было дополнено

аддитивной составляющей, которая характеризуется свойствами мембраны и суммой чисел гидратации катиона и аниона электролита. Предложенная система уравнений позволяет рассчитывать селективность при разделении многокомпонентных разбавленных растворов электролитов.

3. Разработан метод двухэтапной технико-экономической оптимизации систем водоподготовки на основе ОО, направленный на поиск структурной организации и выбор режимов эксплуатации, обеспечивающих минимальную себестоимость очищенной воды.

4. Разработан и испытан действующий прототип компьютерной программы для расчета и оптимизации систем водоподготовки на основе ОО.

5. Разработана мобильная установка подготовки деминерализованной воды для гемодиализа, при расчете и проектировании которой использовалась модифицированная математическая модель обратного осмоса. Изготовлены и внедрены три установки, которые в настоящее время эксплуатируются в: КОГБУЗ «Кировская областная клиническая больница» г. Киров – 1 шт, КОГБУЗ «Омутнинская ЦРБ», г. Омутнинск – 2 шт.

Список публикаций по теме диссертации

1. Анисимов С.И., Орлов Н.С. Исследование массопереноса при деминерализации разбавленных растворов сильных электролитов обратным осмосом //Мембраны и мембранные технологии. 2018. Т8. №6. С. 381-387.

2. Жилин Ю.Н., Анисимов С.И. Оценка энергетических затрат опреснения солоноватых вод обратным осмосом // Химическая промышленность сегодня. 2017. №6. С. 30-35.

3. Орлов Н.С., Анисимов С.И. Техничко-экономическое обоснование разработки систем опреснения на основе традиционных и возобновляемых энергоресурсов // Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. 2018. №1. С. 95-112.

4. Анисимов С.И. Некоторые особенности переноса электролитов через обратноосмотические мембраны //Успехи в химии и химической технологии. 2015. Т.29. №2. С. 119-122.

5. Анисимов С.И. Исследование массопереноса при обратноосмотическом разделении растворов электролитов //Успехи в химии и химической технологии. 2016. Т.30. №2. С. 111-113.