

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента на диссертационную работу Анисимова Сергея Игоревича «Технико-экономическая оптимизация систем водоподготовки на основе обратного осмоса», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.17.18 – Мембранные и мембранные технологии.

### **Актуальность работы.**

После создания в начале 60-х годов прошлого столетия асимметричных обратноосмотических мембран [Loeb & Sourirajan] технология обратного осмоса (ОО) стала самой распространенной среди мембранных методов. Она включает в себя как получение пресной воды, так и водоподготовку (глубокую деминерализацию воды) в энергетике, фармацевтике и многих других областях. Создание оросительных станций и систем подготовки деминерализованной воды большой единичной мощности требует значительных капитальных и эксплуатационных затрат. Кроме того, ОО технология включает много стадий и технологических переделов (начиная с систем водозабора и кончая системами водораспределения), что также осложняет проектирование таких оросительных заводов. Поэтому поставленная в настоящей работе задача разработки метода технико-экономической оптимизации ОО оросительных систем является актуальной.

### **Структура и содержание работы**

Диссертационная работа С.И. Анисимова, выполненная на кафедре мембранных технологий РХТУ им. Д.И. Менделеева, состоит из введения, 6 глав, заключения, списка цитируемой литературы, включающего 87 наименований, приложения, изложена на 132 страницах, содержит 45 рисунков и 10 таблиц.

**Во введении** обосновываются выносимые на защиту положения: актуальность, цель работы, научная новизна и практическая значимость работы.

**Первая глава диссертации** представляет собой обзор литературы. Здесь предметно рассмотрены проблемы, определяющие тематику всей работы: оптимизация технологических систем ОО, структура и свойства ОО-мембран. Особое внимание автор уделил вопросам математического описания процессов массопереноса, включая модели неравновесной термодинамики (модели Качальского-Кедем, Шпиглера-Кедем и др.), а также модель растворения-диффузии. Следует отметить, что автор в своем литературном обзоре, к сожалению, не цитирует современные работы по модели растворения-диффузии. Одна из таких важных работ – статья Пола (D.R. Paul, Reformulation of the solution-diffusion theory of reverse osmosis, J. Membr. Sci. 241 (2004) 371–386) – хотя и указана в списке литературы, но не обсуждается в тексте диссертации. Также не рассмотрены в этом разделе недавние обзоры по ОО, например, [G.M. Geise, D.R. Paul, B.D. Freeman, Fundamental water and salt transport properties of polymeric materials, Prog. Polym. Sci. 39 (2014) 1–42; J.R. Werber, C.O. Osuji, M. Elimelech, Materials for next-generation desalination and water purification membranes, Nat. Rev. Mater. 1 (2016) 16018].

**Вторая глава диссертации** (экспериментальная часть) содержит подробное описание применяемых реагентов и материалов, схему лабораторной установки для исследования массопереноса в процессе ОО при низких концентрациях электролитов в водных

растворах. Описаны предложенные автором методика проведения таких экспериментов и примененные методы анализа исходных растворов и получаемых продуктов. Достоверность получаемых результатов определяется применением широкого спектра современных аналитических методов: прямая потенциометрия с ионселективными электродами, турбидиметрический анализ, комплексонометрическое титрование, атомно-абсорбционный анализ.

**В третьей главе** приводится сравнение зависимостей коэффициентов массопереноса электролитов от концентрации, рассчитанных с помощью программы «Winflows» фирмы «General Electric», с экспериментальными результатами. Расчет осуществлялся с применением разделительных модулей, оснащенных мембранным типа «Desal», маркированных как AK8040F – 400, AG8040G – 400 и AD8040 – 400. Оказалось, что зависимость коэффициентов массопереноса от концентрации в растворе различна для исследованных электролитов. Поскольку, как утверждает автор, «найти обоснование этому различию не удалось», были выполнены эксперименты по измерению коэффициентов массопереноса электролитов с применением модуля TW30 1812-75 (материал мембранны, к сожалению, не указан).

Для описания процесса ОО автор использовал подход на основе модели растворения-диффузии. Это классическая модель, известная с 1960-х гг., широко используется для расчета селективности ОО-мембран и сегодня. В своей стандартной форме модель растворения-диффузии содержит два параметра (гидравлическая проницаемость и проницаемость растворенного вещества). В развитие модели сначала автор добавляет к диффузионному потоку растворенной соли конвективный вклад, пропорциональный трансмембральному давлению (разд. 3.4, уравнение (3.17)). Это выглядит логично и напоминает выражение т.н. модели растворения-диффузии с дефектами (“Solution-diffusion-imperfection model”), в которой этот 2-й вклад описывает течение растворенного вещества через поры. Затем автор добавляет третье дополнительное слагаемое (уравнение (3.20.)), которое является некой константой и должно “исправить” модель растворения-диффузии при малых концентрациях соли в питающем растворе (менее 5 моль/м<sup>3</sup>). Окончательную форму модифицированная модель растворения-диффузии приобретает в **главе 4**, которая называется «Математическая модель обратного осмоса». Здесь автор убирает конвективный член из выражения для потока соли и записывает его в виде (4.5) как суммы обычного диффузионного вклада и дополнительного постоянного слагаемого, о котором говорилось выше. Коэффициент распределения электролита автор рассчитывает через свободную энергию переноса иона в мембрану (уравнение (4.8)); эта энергия включает в себя вклад, пропорциональный трансмембральному давлению.

**В пятой главе** на основе совокупности экспериментальных данных в сочетании с предложенной математической моделью автор предложил метод двухэтапной технико-экономической оптимизации систем водоподготовки на основе ОО, направленный на поиск технологической схемы и выбор режимов эксплуатации, обеспечивающих минимальную себестоимость очищенной воды. Данный алгоритм реализован автором в виде компьютерной программы. В работе приведены ее основные функции и графический интерфейс.

**Шестая глава** посвящена апробации компьютерной программы на примере аванпроекта станции орошения прибрежных вод Черного и Азовского морей.

## **Научная новизна диссертационной работы**

Определен нижний предел осуществления процесса ОО, характеризующийся концентрацией электролита у поверхности композитной полиамидной мембранны, при которой ее селективность стремится к нулю.

Предложено математическое описание ОО на основе модели растворение-диффузия, дополненной слагаемым, которое зависит от свойств мембранны и суммы чисел гидратации катиона и аниона электролита. Модель позволяет рассчитывать селективность при разделении многокомпонентных разбавленных растворов электролитов.

Развит метод технико-экономической оптимизации систем водоподготовки на основе ОО, направленный на обеспечение минимальной себестоимости очищенной воды.

## **Практическая значимость**

Разработана и успешно апробирована компьютерная программа расчета и оптимизации систем водоподготовки на основе ОО. С помощью этой программы были рассчитаны аванпроекты опреснительных заводов в городах Керчь и Евпатория. Себестоимость опресненной воды при среднесуточном тарифе на электроэнергию 3,8 руб./КВт·час составила 38 руб/м<sup>3</sup>, при генерации энергии электростанцией на основе фотоэлементов и ветрогенератора – 148 руб/м<sup>3</sup>.

Изготовлены и внедрены три мобильные установки (комплекс КВ-0,06 ВО) подготовки деминерализованной воды для гемодиализа, которые в настоящий момент эксплуатируются на следующих объектах: КОГБУЗ «Кировская областная клиническая больница» г. Киров, КОГБУЗ «Омутнинская ЦРБ», г. Омутнинск.

В целом, диссертация Анисимова Сергея Игоревича представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой автор предложил метод технико-экономической оптимизации систем водоподготовки на основе обратного осмоса и успешно реализовал технологические подходы и разработанную компьютерную программу на практике.

## **Замечания по работе**

1. Уравнения модели растворения-диффузии (и ее модификаций) предполагают, что потоки компонентов раствора через мембрану стационарны. Однако во всем тексте слово «стационар» ни разу не встречается. Проводились ли эксперименты, доказывающие установление стационарного режима при массопереносе?

2. Полученная модель массопереноса, как говорит автор на с. 73, содержит 5 параметров (при фиксированной температуре – 4 параметра). По-видимому, к числу параметров необходимо добавить коэффициент диффузии растворенного вещества. Между тем в стандартной модели растворения-диффузии для описания ОО бинарного раствора требуются лишь 2 параметра. К сожалению, нет какого-либо сравнения модифицированной и стандартной модели растворения-диффузии.

3. Коэффициент распределения иона металла в мембране рассчитывался по модельному выражению (4.8). Из работы не ясно какие результаты были получены и согласуются ли они с экспериментом.

Высказанные замечания не носят принципиального характера и не влияют на общую положительную оценку работы.

Диссертационная работа Анисимова Сергея Игоревича на тему «Технико-экономическая оптимизация систем водоподготовки на основе обратного осмоса» является законченным научно-исследовательским трудом, выполненным автором самостоятельно на высоком научном уровне и имеет единство изложения. Полученные автором результаты достоверны, выводы и заключения обоснованы.

Диссертация соответствует требованиям паспорта специальности 05.17.18 – Мембранные и мембранные технологии в пунктах: 2 – «Теория мембранных процессов, механизмы переноса компонентов через мембранные различной природы. Кинетика мембранных транспорта»; 4 – «Технологические схемы с применением мембранных процессов, их экономическое и экологическое обоснование»; 7 – «Методы расчета и оптимизация режимов работы мембранных аппаратов и систем с целью улучшения конструкции аппаратов и повышения эффективности их работы. Изучение особенностей мембранных систем, таких как концентрационная поляризация, и методов борьбы с этим явлением».

Основные результаты диссертации Анисимова С.И. опубликованы в 2 статьях, опубликованных в рецензируемых журналах из списка ВАК. Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

На основании вышеизложенного считаю, что работа отвечает требованиям п.7 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» ВАК РФ, утвержденным Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842, а ее автор Анисимов Сергей Игоревич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности по специальности 05.17.18 – «Мембранные и мембранные технологии».

**Официальный оппонент:**

Главный научный сотрудник  
ИНХС РАН им. А.В. Топчиева,  
доктор химических наук, профессор  
e-mail: vvvolkov@ips.ac.ru  
телефон: +7 495 647 59 27 доб. 293  
[www.polymem.ru](http://www.polymem.ru)  
[www.ipm.ac.ru](http://www.ipm.ac.ru)

В.В. Волков  
«03» декабря 2018 г.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Ордена Трудового Красного Знамени Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева Российской академии наук  
119991, г. Москва, Ленинский пр., д. 29



Подпись В.В. Волкова заверяю  
Ученый секретарь ИНХС РАН  
кандидат химических наук

Ю.В. Костина