

УТВЕРЖДАЮ

Первый проректор

ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский  
технологический университет»

д.т.н., профессор

Н.И. Прокопов

« 22 » ноября 2021 г.



### **ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ**

на диссертационную работу **Сальникова Николая Александровича** «Мембранная очистка санитарно-гигиенической воды в замкнутой системе водообеспечения», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.17.08 – Процессы и аппараты химических технологий (технические науки)

#### **Актуальность темы диссертации**

В настоящее время все большее значение приобретает использование энерго- и ресурсосберегающих технологий в химической промышленности. Ужесточение экологической ответственности требует от предприятий переходить на оборотное водоснабжение, т.е. повторно применять уже использованную воду после ее очистки, или внедрять технологии, обеспечивающие высокую степень чистоты отработанной воды, возвращаемой в водоемы. Однако есть области науки и техники, где вопрос повторного использования отработанной воды становится ключевым. В частности, к ним относятся пилотируемые космические станции для дальних перелетов, в которых сброс отработанной воды не возможен из-за отсутствия способов ее пополнения в требуемых объемах. Во многом, подобные проблемы могут возникать для систем жизнеобеспечения подводных лодок и бомбоубежищ и, если проблемы обеспечения питьевой водой еще как-то решены, то проблема обеспечения водой для санитарно-гигиенических нужд, где ее требуется гораздо больше, еще не нашла своего обоснованного решения.

Способы очистки воды для вторичного использования подробно исследованы. Один из перспективных – процесс обратного осмоса, реализуемый путем селективного прохождения воды через полупроницаемую перегородку, мембрану. Однако его применение для очистки санитарно-гигиенической воды или промышленных стоков

ограничено невысокими коэффициентами извлечения чистой воды и высокими давлениями во внутреннем канале обратноосмотического аппарата, что весьма энергозатратно. Для практического использования, особенно в космонавтике, подобная ситуация критична.

В связи с этим, исследования, направленные на поиск энерго- и ресурсосберегающих режимов обратноосмотических процессов применительно к очистке сточных или санитарно-гигиенических вод в условиях долговременных космических полетов, а также разработка и практическое испытание прототипа такой установки очистки являются перспективными и определяют актуальность диссертационной работы Сальникова Н.А.

Работа выполнена на кафедре процессов и аппаратов химической технологии Московского политехнического университета.

### **Цель работы**

Решение новой научно-технической задачи регенерации воды методом обратного осмоса с высоким коэффициентом извлечения (возврата) чистой воды в замкнутом цикле санитарно-гигиенического водообеспечения.

### **Научная новизна и достоверность диссертационных исследований**

Научная новизна представленной работы заключается в том, что в ней предложена и апробирована система регенерации воды из многокомпонентных растворов низкомолекулярных органических и минеральных веществ, а также энерго- и ресурсосберегающие режимы ее работы: при ранее не исследованных сравнительно низких рабочих давлениях (до 1 МПа) и высоких степенях концентрирования загрязняющих органических компонентов с обеспечением степени возврата воды до 98 % при селективности разделения более 99 %. При непосредственном участии автора диссертации разработаны способ и устройство обратноосмотической очистки санитарно-гигиенической воды, которые защищены патентами РФ.

При разработке модели процесса переноса воды через мембрану впервые учтено, что при очистке воды от моющего средства осмотическое давление разделяемого раствора у поверхности мембраны определяется слоем связанных с мембраной компонентов моющего средства.

В диссертационной работе предложена новая методика оценки осмотического давления раствора у поверхности мембраны, основанная на использовании коэффициента проницаемости мембраны и фактической производительности аппарата.

Достоверность результатов диссертационной работы подтверждается использованием стандартных методов физико-химических измерений, поверенных средств измерений, а также моделей процесса, построенных на основе законов сохранения с использованием известной аналогии Льюиса. Результаты расчетов автора диссертации хорошо согласуются с известными и собственными экспериментальными данными.

### **Практическая значимость результатов диссертации**

Практическая значимость диссертационной работы определяется следующими положениями:

- Показана возможность и перспективность применения низконапорного обратного осмоса для регенерации санитарно-гигиенической воды на космической станции в условиях длительного полета.

- Разработана методика расчета производительности аппарата обратноосмотической очистки воды при высоких степенях ее извлечения, основанная на использовании аналогии между массообменом и теплообменом и учитывающая взаимодействие разделяемого раствора с материалом мембраны. Для выполнения расчетов по этой методике разработано оригинальное программное обеспечение. Разработанная методика внедрена и используется в АО «НИИхиммаш», акт внедрения методики представлен в приложении.

- Автором диссертации выполнено испытание прототипа системы регенерации санитарно-гигиенической воды, который показал свою эффективность, обеспечивая высокую степень извлечения воды при малом энергопотреблении, поэтому может являться основой для проектирования перспективных систем регенерации санитарно-гигиенической воды.

### **Общая характеристика работы**

Диссертация включает введение, пять глав, заключение, список использованной литературы и пять приложений (А – Д). Текст диссертации напечатан на 162 страницах (из них 24 страницы – приложения) и содержит 49 рисунков и 38 таблиц, 79 литературных источников.

**Во введении** представлено обоснование актуальности, степень разработанности темы, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, методология и методы исследования, достоверность полученных результатов, также приводятся положения, выносимые на защиту.

**В первой** главе приведен критический обзор литературных источников, касающихся процессов регенерации санитарно-гигиенической

воды, особое внимание уделено особенностям ее использования на борту космических станций, представлен баланс использования воды в расчете на одного космонавта, проанализирован отечественный и зарубежный опыт создания систем регенерации. Рассмотрены основы метода обратноосмотической очистки воды, для промышленных и коммунальных стоков показаны его преимущества и недостатки перед альтернативными.

Во **второй** главе представлены результаты, посвященные анализу особенностей обратноосмотической очистки санитарно-гигиенической воды, выявлены химические особенности ее загрязнения. Подробно обсуждается один из механизмов процесса мембранной очистки при наличии концентрационной поляризации низкомолекулярных органических примесей на внутренней поверхности мембраны, приводящий к снижению скорости регенерации воды. Предложен механизм возникновения такой поляризации, что позволило получить все необходимые оценки для безразмерных параметров, описывающих массоперенос воды через мембрану. Интересным является подход автора к рассмотрению особенностей массопереноса при мембранном разделении с учетом концентрационной поляризации, основанный на использовании аналогии Льюиса.

Физически оправданным представляется изложенный в этой главе подход автора к определению движущей силы процесса массопереноса через мембрану, как разность между рабочим давлением в аппарате и осмотическим давлением в поляризационном слое вблизи ее поверхности. Основываясь на этом подходе, в диссертации предложена соответствующая расчетно-экспериментальная методика определения движущей силы. Также адекватными представляются оценки производительности мембраны на основе представления о фильтровании с образованием осадка.

В **третьей** главе представлены результаты, относящиеся к экспериментальной части исследования обратноосмотической регенерации санитарно-гигиенической воды: приведены данные по ее присному составу, об используемых в эксперименте мембранных модулях, дано описание лабораторной установки и прототипа установки регенерации санитарно-гигиенической воды для космических аппаратов, а также изложены методики проведения экспериментов.

Для выявления закономерностей разделения растворов низкомолекулярных органических веществ обратным осмосом в этой главе приведены экспериментальные данные и выполнен их анализ для определения изменения селективности и удельной производительности мембран для различных условий проведения процесса. Исследования были выполнены как для модельных сред (без концентрационной поляризации на

мембране), так и для реальной санитарно-гигиенической воды. Проведенная оценка погрешности измерений показала, что она не превышает 3 %.

Полученные во второй и третьей главах новые теоретические и экспериментальные результаты позволили выявить некоторые особенности и уточнить закономерности обратноосмотического разделения модельных растворов моющего средства в воде и натуральных сточных вод. Среди них можно выделить более чем двукратное снижение производительности обратноосмотических мембран РМ33К после контакта с моющим средством, постоянство селективности мембран при очистке воды от моющего средства и рост селективности с повышением давления.

**В четвертой** главе приведены и проанализированы результаты экспериментальных исследований прототипа системы регенерации воды на натурной санитарно-гигиенической воде. В частности установлено, что селективность мембраны РМ33К превышает 98%. Качество регенерированной воды после проведения доочистки соответствует требованиям нормативов. Степень извлечения воды составляет до 0,97.

Установлено, что дополнительные загрязнения, содержащиеся в натурной санитарно-гигиенической воде, оказывают значительное влияние на снижение производительности мембраны. Это свидетельствует о наличии осадка на мембране и влечет за собой необходимость предварительной фильтрации воды перед подачей на ступень обратного осмоса.

**В пятой** главе рассмотрены перспективы применения систем низконапорного обратного осмоса для регенерации санитарно-гигиенических вод, образующихся на космических станциях, предприятиях химического и бытового профиля. Указано, что экономический эффект от внедрения такой системы очистки, например, на борту Международной космической станции (естественно, в зависимости от набора средств санитарно-гигиенического обеспечения) может достигать 6,5 млн. долларов США в год (при стоимости доставки одного килограмма груза на МКС 22000 долларов США).

**Заключение** содержит основные результаты диссертационной работы и выводы.

**Приложения** содержат таблицы экспериментальных данных, полученных как на лабораторной, так и на прототипе реальной установки очистки санитарно-гигиенической воды, программный код для расчета производительности обратноосмотической установки, расчет затрат на индивидуальную гигиеническую процедуру на борту космической станции, акт внедрения результатов диссертационной работы.

## **Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации**

Результаты и выводы диссертации рекомендуется использовать:

- при проектировании систем жизнеобеспечения космических станций, предназначенных для дальних перелетов;
- на предприятиях химической, пищевой и фармацевтической промышленности, в проектных организациях при разработке новых и совершенствовании действующих технологий очистки бытовых сточных вод;
- в моделирующих пакетах, используемых для проектирования процессов низконапорной обратноосмотической очистки воды от низкомолекулярных органических примесей;
- в учебном процессе химико-технологических вузов при подготовке магистров, аспирантов и повышении квалификации работников отрасли.

## **Вопросы и замечания по диссертационной работе**

1. При рассмотрении поляризационного слоя на мембране предполагается постоянство его толщины за счет динамического равновесия конвективных и диффузионных процессов. Это возможно, если конвективный поток вещества на мембрану, определяющий скорость фильтрации воды через нее, сопоставим с диффузионным потоком примесных частиц от поверхности мембраны в ядро потока. В этом случае скорость протока жидкости через мембрану должна быть существенно меньше полученных экспериментальных данных по производительности мембраны. Проводились ли автором соответствующие оценки?

2. Автор оценивает движущую силу массопереноса воды через мембрану как разность давления в канале и осмотического давления разделяемого раствора при выбранных концентрациях испытуемых веществ. Согласно данным, приведенным на рис. 2.4 и 2.5 при выбранных максимальных концентрациях примесей осмотическое давление составляет порядка 0,6 МПа, тогда как рабочее давление в канале принималось равным 0,8 МПа. Такого перепада давлений достаточно для обеспечения требуемой скорости массопереноса при обратном осмосе, поскольку требуется еще и преодоление сопротивления мембраны?

3. В табл. 2.1 и 3.1 приведены качественные физико-химические показатели и химический состав сточных вод. Однако в работе отсутствуют ссылки на нормативную методическую документацию, согласно которой эти параметры и концентрации примесных веществ определялись.

4. Почему автор в работе отдал предпочтение мембранам рулонного типа, а не половолоконным, хотя последние из-за их сравнительно малого веса представляются более предпочтительными для доставки в космос?

5. Количество литературных источников, анализируемых в диссертационной работе, было бы полезно несколько увеличить. В частности, в диссертации для описания работы мембраны используется так называемый механистический подход, основанный на представлении ее как фильтрующей перегородки. В то же время, например, в работах С.Ф. Тимашева (ссылка на его работы явно недостаточно) рассмотрены и другие физико-химические механизмы мембранного разделения.

6. Непонятно, зачем в работе потребовалось использование подзаголовков до четвертого уровня, но если это сделано, почему они не вынесены в оглавление? Зачем потребовалось в выводах использовать подпункты, которые, по сути, являются полноценными отдельными выводами?

#### **Публикации и автореферат**

Основные результаты диссертационной работы изложены в 20 публикациях, из них 1 – в издании, рекомендованном ВАК, 2 – в изданиях, включенных в международную базу Scopus. Получены патенты на изобретение и полезную модель. Результаты работы докладывались на 14 международных и национальных научно-технических конференциях.

Публикации и автореферат отражают основное содержание диссертации. Выводы по работе соответствуют полученным результатам.

#### **Соответствие диссертации научной специальности**

Диссертация соответствует паспорту научной специальности 05.17.08 – Процессы и аппараты химических технологий в части «совершенствования аппаратного оформления технологических процессов с позиций энерго- и ресурсосбережения» и «решения проблем совершенствования и создания эффективных технологических схем и производств на основе использования современных машин и аппаратов».

Области исследований включают: «исследования массообменных процессов и аппаратов», «методы изучения и создания ресурсо- и энергосберегающих процессов и аппаратов в химической и смежных отраслях промышленности, обеспечивающие минимизацию отходов, газовых выбросов и сточных вод».

## **Заключение**

Диссертационная работа Сальникова Н.А. на тему «Мембранная очистка санитарно-гигиенической воды в замкнутой системе водообеспечения» полностью соответствует требованиям п. 2.1 «Положения о присуждении ученых степеней в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева». Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой изложены новые научно обоснованные технические и технологические решения и разработки, направленные на повышение эффективности обратноосмотических процессов регенерации воды в замкнутом цикле санитарно-гигиенического водообеспечения, имеющие существенное значение для развития страны.

Автор работы Сальников Николай Александрович заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.17.08 – Процессы и аппараты химических технологий.

Отзыв рассмотрен, обсужден и одобрен на заседании кафедры «Процессы и аппараты химических технологий имени Гельперина Н.И.» ФГБОУ ВО «МИРЭА - Российский технологический университет» (Протокол № 4 от «24» ноября 2021 г.).

Заведующий кафедрой  
ПАХТ им. Гельперина Н.И.,  
д.ф.-м.н, доцент



А.В. Вязьмин

«26» ноября 2021 г.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет»  
Почтовый адрес: 119454 г. Москва, проспект Вернадского, дом 78  
тел.: +7 499 215-65-65 доб. 854  
e-mail: mirea@mirea.ru  
<https://www.mirea.ru/>