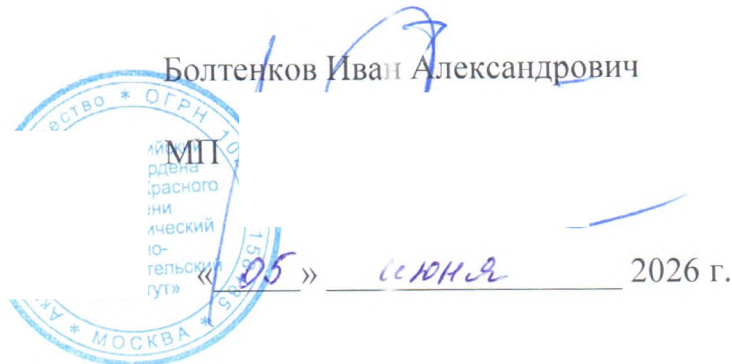


УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор

Болтенков Иван Александрович



ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Акционерного общества «Всероссийский дважды ордена Трудового Красного Знамени теплотехнический научно-исследовательский институт» (АО «ВТИ») на диссертацию Смирнова Александра Александровича «Повышение эффективности установок обратного осмоса», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 2.6.15. Мембраны и мембранная технология (технические науки)

Актуальность темы диссертации. Представленная диссертация посвящена повышению эффективности работы установок обратного осмоса за счет снижения количества концентрата и введения компенсирующих мероприятий для сохранения и улучшения качества пермеата и снижения эксплуатационных расходов.

Технология обратного осмоса занимает лидирующее место среди других методов обессоливания воды, что связано с невысокой стоимостью единицы продукции и удалением 98% растворенных солей без применения реагентов. Снижение негативного воздействия на окружающую среду, достигаемое за счет снижения объемов потребляемой воды и минимизации количества сточных вод систем обессоливания воды, является важной задачей.

В связи с этим, тема диссертационного исследования Смирнова А.А. является актуальной и востребованной в практическом применении.

Научная новизна диссертации заключается в следующем:

1. Разработан новый комплексный подход, позволяющий минимизировать поток концентрата в обратноосмотических установках при обработке вод с солесодержанием до 2 г/л, основанный на поддержании минимально необходимого потока воды над мембраной, оценке предельной степени концентрирования труднорастворимых

веществ и оценке пригодности воды по коллоидной нагрузке математически обоснованным способом.

2. Впервые разработана математическая модель методики определения коллоидного индекса, на основе которой введено понятие обобщенного коллоидного индекса.

3. Для комбинированных систем обессоливания воды, включающих технологию обратного осмоса и противоточного ионного обмена, установлены неочевидные отличительные особенности работы фильтров ионного обмена на доочистке пермеата обратного осмоса.

4. Разработан новый комплексный подход к построению системы двухступенчатого обратного осмоса с двухступенчатым удалением углекислоты на основе комбинации физического и химического способов.

Теоретическая и практическая значимость работы состоит в следующем:

1. Разработан простой и экономически эффективный способ увеличения степени извлечения фильтрата установок обратного осмоса непрерывного типа; определены факторы, лимитирующие степень извлечения фильтрата и намечены пути преодоления их влияния.

2. Разработан и апробирован новый метод определения качества и пригодности исходной воды для подачи на обратноосмотические мембраны по содержанию в ней коллоидных частиц – обобщенный коллоидный индекс.

3. Установлены важные для эксплуатации систем водоподготовки отличия процесса регенерации катионообменных фильтров, в которых они являются второй ступенью обессоливания воды после одноступенчатых установок обратного осмоса, и разработаны рекомендации по эксплуатации таких систем водоподготовки.

4. Разработана методика и представлен высокоэффективный способ улучшения качества фильтрата двухступенчатых установок обратного осмоса, основанный на применении сочетания физического и химического способов удаления углекислоты из воды в мембранных установках.

Основное содержание работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 117 источников и приложения. Работа изложена на 144 страницах машинописного текста и включает 40 рисунков, 14 таблиц и 47 формул.

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цели исследования, изложены научная новизна, теоретическая и практическая значимость

В первой главе работы представлен обзор различных способов уменьшения количества концентрата установок обратного осмоса (далее – УОО), как с применением

дополнительных реагентных или баромембранных стадий, так и различные модификации процесса обратного осмоса, приводится принцип их работы, эффективность и области применения.

Во второй главе работы представлен предлагаемый метод увеличения степени извлечения фильтрата на УОО с рулонными мембранными элементами типоразмера 8040, заключающийся в поддержании потока концентрата на выходе последнего мембранного элемента не менее $5,1 \text{ м}^3/\text{ч}$ путем введения линии рециркуляции части потока концентрата (10-15% от потока исходной воды), приведено математическое обоснование. Представлены результаты математического моделирования промышленной двухступенчатой обратноосмотической установки, которые показали возможность снижения потока отводимого концентрата УОО на 60% по сравнению с типовыми промышленными УОО и влияние потока рециркуляции на качество фильтрата первой и второй ступени УОО.

Показаны лимиты возможной степени концентрирования, обусловленные образованием нерастворимых соединений в концентрате, таких как карбонаты и сульфаты кальция, кремниевая кислота.

По результатам сравнительного технико-экономического анализа эксплуатационных затрат для одноступенчатой установки обратного осмоса производительностью $50 \text{ м}^3/\text{ч}$ при степени отбора фильтрата 92% установлено, что эксплуатационные расходы снижаются на 26,9% по сравнению с аналогичной УОО, работающей при типовом значении степени отбора фильтрата 75%.

Третья глава работы посвящена оценке пригодности воды для подачи на рулонные мембранные обратноосмотические элементы по содержанию коллоидных примесей. Приведены существующие в настоящее время оценки влияния коллоидных примесей, наиболее распространенным из которых является SDI (коллоидный индекс), показано, что SDI является очень условным параметром и не имеет теоретической основы. Проведен математический анализ процесса фильтрации воды при определении коллоидного индекса, на основании которого разработана методика определения обобщенного коллоидного индекса (ОКИ). Предложенная методика апробирована на воде с разным содержанием коллоидных частиц и экспериментальным путем установлена состоятельность теоретических выводов, лежащих в ее основе. Установлен критерий пригодности воды для подачи на обратноосмотические мембраны $\text{ОКИ} = 5,13$.

Обнаружено резкое падение производительности тестовой мембраны на всех испытанных образцах воды, которое вносит существенный вклад в итоговое значение коллоидного индекса воды, что не учитывается стандартной методикой измерения.

Предложена модифицированная методика измерения коллоидного индекса SDI путем сдвига начала измерений на 50 секунд от момента подачи пробы на тестовую мембрану.

В четвертой главе установлены важные отличительные особенности эксплуатации систем глубокого обессоливания воды на основе комбинации процессов ОО и ионного обмена (ИО). Преимуществом таких систем является то, что на первой стадии обессоливания на УОО удаляется > 98% растворенных солей (без использования реагентов для регенерации), а остальная часть солей удаляется на стадии ИО. Такая система позволяет получить глубоко обессоленную воду и значительно сократить объемы используемых химических реагентов и сточных вод, образующихся в процессе регенерации.

Проведены исследования сорбированных ионов на пробе катионита промышленного фильтра комбинированной системы обессоливания, результаты которых показали, что характер ионной нагрузки на катионит существенно отличается от таковой на второй ступени ИО в традиционных системах обессоливания.

Для эффективного восстановления работоспособности катионита в комбинированных системах требуется ступенчатое проведение регенерации: в начале - 1,5%, а затем - 4-6% раствором серной кислотой. Рекомендована организация непрерывного мониторинга остаточной жесткости после мембранных ступеней, определение необходимого избытка регенеранта, зависящее в том числе от конструкции катионитового фильтра.

В пятой главе рассматривается влияние растворенной в воде углекислоты на качество ОО пермеата и результативность работы системы получения глубокообессоленной воды в целом. Углекислота в пермеате будет являться основной ионной нагрузкой на стадиях ИО или электродеионизации.

Для глубокого удаления CO_2 предложена комбинация физического и химического методов удаления CO_2 в системах обессоливания на базе двухступенчатых УОО в качестве основной стадии обессоливания. Удаление большей части углекислоты осуществляется физическим способом в вакуумно-эжекционных декрбанизаторах из пермеата первой ступени ОО. Оставшаяся углекислота переводится в ионную форму щелочью, вводимой в поток исходной воды для второй ступени ОО, и поддержанием значения pH на уровне 8,5 ед. Полученные в результате этого карбонат- и гидрокарбонат-ионы задерживаются мембраной второй ступени ОО и отводятся в поток концентрата.

Сравнительный расчет эксплуатационных затрат показал, что использование предложенного комбинированного способа удаления углекислоты позволяет в 14 раз снизить нагрузку на последующую стадию ИО, что приводит к существенной экономии реагентов при эксплуатации установок глубокого обессоливания.

В заключении диссертационной работы сформулированы основные выводы и результаты проведенного научного исследования.

По диссертационной работе имеются следующие вопросы и замечания:

1. Может ли быть применён предлагаемый в главе 2 способ уменьшения потока концентрата для установок нанофильтрации?

2. В работе утверждается, что минимальный поток концентрата для элемента 8040 должен составлять 5,1 м³/ч (стр. 39–40). Однако не указано, как этот вывод коррелирует с данными производителей мембран (например, DuPont, Toray) для вод с температурой >25 °С или высокой вязкостью. Учтены ли температурные поправки?

3. В таблице 2 (стр. 51) приведена экономическая эффективность, но не раскрыта методика расчёта стоимости сброса концентрата при солесодержании >3 г/л (коэффициент 1,5). Чем обоснован этот коэффициент?

4. С.51. Сравнительный расчет эксплуатационных затрат проведен без учета региона эксплуатации, цены в разных регионах могут значительно отличаться.

5. Предложен новый показатель – обобщённый колоидный индекс (ОКИ) с предельным значением 5,13. Однако в работе не приведена статистическая обработка результатов измерений (среднеквадратичное отклонение, доверительный интервал). Какова воспроизводимость ОКИ при многократных измерениях на одной и той же воде?

6. С.94. Чем может быть обусловлено резкое падение производительности тестовой мембраны? Проводились ли исследования этого явления?

7. С.104. Из графика видно значительное содержание ионов железа в пробе катионита, нехарактерно высокое по сравнению с другими ионами. Чем это может быть обусловлено?

8. С.124. Указанное значение рН = 8,5 как значение, при котором вся углекислота переходит в ионную форму является завышенным относительно общеизвестного значения рН = 8,3 полного перехода форм углекислоты в карбонат- и гидрокарбонат-ионы.

9. Как предлагаемый способ уменьшения концентрата (рециркуляция) влияет на накопление микроорганизмов в системе – не создаётся ли благоприятная среда для биообрастания?

10. В диссертации предлагается подщелачивание перед второй ступенью ОО до рН 8,5 для связывания остаточной углекислоты. Однако при этом в воду вводятся ионы Na⁺, часть которых (1–2% при селективности мембраны 98–99%) неизбежно проникает в пермеат. Проводилась ли количественная оценка роста концентрации натрия в конечном пермеате? Не ухудшает ли это качество воды для подпитки котлов высокого давления?

Однако сделанные замечания не влияют на общую положительную оценку данной

диссертационной работы, выполненной на высоком научном и экспериментальном уровне. Достоверность полученных автором результатов подтверждается использованием методик эксперимента, соответствующих современному научному уровню, воспроизводимостью результатов, а также согласованностью результатов с опубликованными данными. Основные выводы диссертации обоснованы и логично вытекают из содержания работы.

Практическая значимость подтверждается актом внедрения результатов диссертации в деятельность АО «НПК Медиана-Фильтр».

Автореферат полностью отражает содержание диссертации. Результаты работы неоднократно докладывались на международных конференциях. По теме диссертации опубликовано 9 научных работ, в том числе 3 статьи в изданиях, индексируемых в международных базах данных Web of Science, Scopus, Chemical Abstracts.

По своему содержанию диссертационная работа Смирнова А.А. соответствует паспорту научной специальности 2.6.15. Мембраны и мембранная технология в части п. 3. «Разработка принципов функционирования мембран различного назначения (обратноосмотических, нано-, ультра-, микрофильтрационных, первапорационных, ионообменных, газоразделительных) при мембранном разделении компонентов жидких и газовых смесей, в том числе в мембранных контакторах и мембранном катализе»; п. 4. «Технологические схемы с применением мембранных процессов, их экономическое и экологическое обоснование»; п. 5. «Мембранные процессы очистки, извлечения (кондиционирования) жидких и газообразных энергоносителей из смесей их содержащих природного, биогенного и техногенного происхождения. Комбинированные и гибридные процессы мембранной технологии (сочетание мембранных процессов с другими процессами химической технологии: абсорбцией, адсорбцией, ректификацией, дистилляцией)»; п. 7. «Методы расчета и оптимизация режимов работы мембранных аппаратов и систем с целью улучшения конструкции аппаратов, мембранных модулей и повышения эффективности их работы. Изучение особенностей мембранных систем, таких как концентрационная поляризация, засорение и старение мембран, и методов борьбы с этими явлениями.»

Диссертация Смирнова А.А. представляет собой научно-квалификационную работу, в которой изложены научно обоснованные технологические решения задачи создания современных эффективных обратноосмотических установок обессоливания воды, внедрение которых позволит получить значительный экономический и экологический эффект.

По актуальности, новизне, теоретической и практической значимости диссертация Смирнова Александра Александровича на тему «Повышение эффективности установок

обратного осмоса» соответствует требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева», утвержденного приказом и.о. ректора РХТУ им. Д.И. Менделеева от 14.09.2023 г. № 103 ОД, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор, Смирнов Александр Александрович, заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.6.15. Мембраны и мембранная технология.

Отзыв ведущей организации подготовлен Макаровой Еленой Владимировной, первым заместителем заведующего отделением водно-химических процессов Акционерного общества «Всероссийский дважды ордена Трудового Красного Знамени Теплотехнический научно-исследовательский институт», кандидатом технических наук.

Отзыв ведущей организации был рассмотрен и одобрен на заседании научно-технического совета отделения водно-химических процессов Акционерного общества «Всероссийский дважды ордена Трудового Красного Знамени Теплотехнический научно-исследовательский институт», протокол от 21 мая 2026 г. № 2.

Заведующий отделением
водно-химических процессов
Акционерного общества
«Всероссийский дважды ордена
Трудового Красного Знамени
Теплотехнический научно-исследовательский
институт» (АО «ВТИ»)

Акулич Раиса Васильевна

Первый заместитель
заведующего отделением
водно-химических процессов,
кандидат технических наук

Макарова Елена Владимировна


Подпись Акулич Р.В. заверяю.

Макаровой Е.В.

Руководитель отдела подготовки
и аттестации научных кадров АО «ВТИ»

А.М. Федорова

05 июня 2026 г. МП



Акционерное общество «Всероссийский дважды ордена Трудового Красного Знамени теплотехнический научно-исследовательский институт» (АО «ВТИ»), РФ, 115280, Москва, ул. Ленинская Слобода, д. 23, стр. 4.; <https://vti.ru/>
Тел.: +7 (495) 137-77-70; +7 (495) 646-41-44;
E-mail: vti@vti.ru