

ОТЗЫВ

официального оппонента **Милютина Виталия Витальевича** на диссертационную работу **Смирнова Александра Александровича** «Повышение эффективности установок обратного осмоса», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.15. Мембраны и мембранная технология (технические науки)

Актуальность темы диссертации. Представленная диссертация посвящена повышению эффективности использования обратноосмотических установок обессоливания воды за счет снижения количества концентрата при одновременном улучшении качества пермеата и снижении эксплуатационных расходов.

В настоящее время технологии обратного осмоса (ОО) являются наиболее перспективными для обессоливания воды, что связано, в первую очередь с относительно низкими затратами электроэнергии по сравнению с другими способами. Постоянное повышение экологических стандартов обуславливает необходимость повышения эффективности процессов водоподготовки за счет сокращения объемов потребляемой воды и минимизации загрязнений окружающей среды вторичными отходами (концентратами ОО).

В связи с этим тематика диссертации Смирнова А.А., направленная на повышение эффективности использования обратноосмотических установок обессоливания воды, является весьма важной и актуальной.

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 определены 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 различных модификаций процесса обратного осмоса, приводится принцип их работы, эффективность и области применения.

Во второй главе работы рассмотрены методы увеличения выхода фильтрата на УОО с мембранными элементами. При математическом моделировании рабочих параметров двухступенчатой промышленной УОО в качестве критерия оптимизации принято обеспечение минимального расхода концентрата на выходе из последнего МЭ не менее 5,1 м³/ч. Полученные результаты показали, что существенное сокращение потребления исходной воды (до 20%) достигается за счет рециркуляции концентрата в объеме 10-15% от расхода исходной воды. При этом, при необходимом качестве пермеата поток отводимого концентрата ОО уменьшается на 60%.

Отмечено, что для определения степени концентрирования следует учитывать возможность образования нерастворимых соединений – карбоната и сульфата кальция, а также кремниевой кислоты.

Сравнительный технико-экономический расчет эксплуатации одноступенчатой УОО производительностью 50 м³/ч со степенью отбора фильтрата 92% (с применением рециркуляции концентрата) показывает снижение эксплуатационных затрат на 26,9% относительно УОО с типовой степенью отбора фильтрата 75%.

Третья глава работы посвящена оценке пригодности воды для подачи на рулонные мембранные обратноосмотические элементы по содержанию коллоидных примесей. Существующие в настоящее время оценки влияния коллоидных примесей не имеют теоретической основы. Разработанная методика определения обобщенного коллоидного индекса (ОКИ) апробирована на воде с разным содержанием коллоидных частиц, и экспериментальным путем установлена состоятельность теоретических выводов, лежащих в ее основе. Установленное предельное значение ОКИ = 5,13, как критерий пригодности воды для подачи на обратноосмотические мембраны, подтверждено критериями пригодности по значениям коллоидного индекса SDI₁₅ и модифицированного индекса загрязняемости MFI.

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 сек от момента подачи пробы на тестовую мембрану.

В четвертой главе работы установлены важные отличительные особенности эксплуатации систем глубокого обессоливания воды на основе комбинации процессов ОО и ионного обмена (ИО). При использовании комбинированных систем обессоливания на стадии ОО удаляется 98-99% растворенных солей, остальная часть солей удаляется на стадии ИО. Такое распределение солевой нагрузки позволяет значительно сократить объемы используемых химических реагентов и уменьшить количество сточных вод, образующихся в процессе регенерации.

Для эффективного восстановления работоспособности катионита в комбинированных системах требуется обязательное ступенчатое проведение регенерации: в начале - 1,5%, а затем - 4-6% раствором серной кислоты. Рекомендовано при техническом перевооружении для катионитовых фильтров в комбинированных ВПУ определять дозу регенеранта, достаточную для вытеснения ионов жесткости вместо использования

нормативных значений ввиду возможной неоптимальной конструкции фильтра в новом месте технологической цепочки.

В пятой главе рассматривается влияние растворенной в воде углекислоты на качества ОО пермеата. При получении глубоко обессоленной воды углекислота в пермеате будет являться основной ионной нагрузкой на стадиях ИО или электродеионизации.

Для высокоэффективного удаления CO_2 предложено двухступенчатое последовательное применение физического и химического методов декарбонизации на промышленных двухступенчатых УОО. Пермеат первой ступени проходит через эжекционные декарбонизаторы, где удаляется большая часть углекислоты. Для связывания оставшейся углекислоты перед второй ступенью ОО в поток воды вводится щёлочь для поддержания значения рН на уровне 8,5 ед., при этом вся оставшаяся углекислота переводится в карбонат- и гидрокарбонат-ионы.

Комбинация физического удаления углекислоты на эжекционно-струйных аппаратах и химического – путем подщелачивания частично обессоленной воды перед УОО второй ступени – позволяет достичь стабильного качества обессоленной воды.

Сравнительный расчет эксплуатационных затрат показал, что использование комбинированного способа удаления углекислоты позволяет в 5-14 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. С.50. Вряд ли приведенные затраты на эксплуатацию установки обратного осмоса можно рассчитать с точностью до десятых руб., с учетом погрешности исходных показателей и колебаний стоимости электроэнергии и реагентов.
2. С.52. Чем предложенный способ безреагентного уменьшения количества концентрата установки обратного осмоса непрерывного типа принципиально отличается от известного обратного осмоса полупериодического действия, описанного в разделе 1.2.3?
3. С.103. «В пробах № 9 и № 10, а также № 13 и № 14 наблюдалось выпадение осадка через 30-40 мин после отбора». Не приведет ли это к забивке трубопроводов, а также к выходу из строя насосов?
4. С.103. «Сбор наиболее концентрированной части регенерата показал, что в процессе регенерации вытеснено 274 мг-экв солей жёсткости, что близко к значению, полученному при регенерации соляной кислотой (340 мг-экв).»

Разве 80%-ная степень регенерации может считаться приемлемой для технологии?

5. С.106. «регенерацию катионита серной кислотой необходимо проводить ступенчато,...». Насколько это технологично – использовать кислоту трех концентраций? Это приведет к увеличению бакового хозяйства и усложнению технологии.
6. С.128. «Экспериментальным путем показано, что сдвиг начала измерений на 50 сек. от момента подачи пробы...». Насколько такое определенное значение времени (50 с) будет действительно для других условий проведения экспериментов? Какой возможный разброс по времени? От чего он зависит?

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 направлений исследований: п.4 «Технологические схемы с применением мембранных процессов, их экономическое и экологическое обоснование» и 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)».

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.

Официальный оппонент:

Доктор химических наук (02.00.14 – Радиохимия), заведующий лабораторией хроматографии радиоактивных элементов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физической химии и электрохимии имени А.Н. Фрумкина Российской академии наук (ИФХЭ РАН).

“04” июня 2026 г.

Милютин Виталий Витальевич

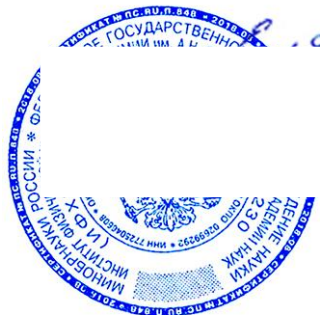
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физической химии и электрохимии имени А.Н. Фрумкина Российской академии наук (ИФХЭ РАН), РФ, 119071, Москва, Ленинский проспект, 31, корп. 4; <http://www.phyche.ac.ru>

Тел.: +7(495)335-9288;

E-mail: vm u

Подпись Милютин Виталия Витальевича удостоверяю:

Зав. канцелярией ИФХЭ РАН



Емельянова Н.А.