

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Российский химико-технологический
университет имени Д.И. Менделеева»**

На правах рукописи

Смирнов Александр Александрович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УСТАНОВОК
ОБРАТНОГО ОСМОСА**

2.6.15. Мембраны и мембранная технология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2026

Работа выполнена в техническом департаменте АО «Научно-производственная компания Медиана-Фильтр».

Научный руководитель: кандидат химических наук,
Смирнов Владимир Брониславович,
генеральный директор
АО «НПК Медиана-Фильтр»

Официальные оппоненты: доктор технических наук
Милютин Виталий Витальевич,
заведующий лабораторией хроматографии
радиоактивных элементов Института физической
химии и электрохимии имени А.Н. Фрумкина РАН
(ИФХЭ РАН), г. Москва

кандидат технических наук
Громов Сергей Львович
старший научный сотрудник, доцент кафедры ТОТ
им. М.П. Вукаловича,
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
"Национальный исследовательский университет
"МЭИ"


Ведущая организация: Акционерное общество «Всероссийский дважды
ордена Трудового Красного Знамени
теплотехнический научно-исследовательский
институт» (АО «ВТИ»)

Защита состоится «26» июня 2026 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета РХТУ.2.6.08 федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева» (125047, г. Москва, Миусская пл., 9) в конференц-зале (ауд. 443).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-библиотечном центре федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева», а также на официальном сайте:
https://www.muotr.ru/university/departments/ods/inhouse/inhouse_announcements/

Автореферат разослан « 25 » мая 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного Совета РХТУ.2.6.08
кандидат технических наук



Атласкин А. А.

Актуальность темы. Среди всех технологий обессоливания воды наиболее быстро растущей по производительности с 1990-х годов является обратный осмос. Эта технология получила широкое распространение из-за относительно низких затрат электроэнергии по сравнению с термическими способами обессоливания в силу отсутствия фазового перехода воды и устойчивостью к загрязнениям в отличие от электродиализа. На обратный осмос в 2019 г. приходилось 69% (65,5 млн м³/сутки) от общего объема опресненной воды в мире.

Постоянное повышение стандартов водоотведения обуславливает необходимость повышения эффективности водопользования, сокращения объемов потребляемой воды и минимизации загрязнений природных водоемов вследствие сброса минеральных и термически нагретых промышленных стоков.

Обычно, в промышленных установках обратного осмоса поток сбрасываемого концентрата первой ступени составляет 25-30 % от потока исходной воды. Сокращение расхода воды на собственные нужды является актуальной задачей на вновь проектируемых и работающих системах водоподготовки.

Необходимо предложить простой и эффективный способ уменьшения количества образующегося концентрата установок обратного осмоса непрерывного типа на основе расчетных и экспериментальных данных с определением границ применимости способа, оценки влияния предлагаемого способа на качество получаемого фильтрата, разработке компенсирующих мероприятий по увеличению качества пермеата в комплексе с корректной оценкой пригодности исходной воды для подачи на мембраны обратного осмоса (далее – ОО) и особенностями работы комбинированных систем обессоливания воды.

Степень разработанности темы. В настоящее время существует значительное количество исследований по уменьшению потока концентрата установок обратного осмоса на основе комбинации процессов обратного осмоса и химических реакций для повышения стабильности концентрата или модификаций баромембранного процесса (OARO, CCRO, PFRO, VSEP и др.), однако уменьшение количества концентрата для наиболее распространенных установок обратного осмоса непрерывного типа без применения дополнительных стадий обработки концентрата или сложных модификаций процесса в сочетании с компенсирующими мероприятиями, направленными на улучшение качества пермеата, является востребованной и недостаточно изученной областью. Таким образом, исследования в данной области отвечают современным потребностям в улучшении систем водоочистки и создании инновационных, устойчивых технологий.

Цель работы: Разработка комплексного подхода по снижению количества концентрата установок обратного осмоса с одновременным улучшением качества пермеата, повышением надежности и снижением расходов на эксплуатацию систем обессоливания воды.

Задачи работы:

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Выделить и исследовать факторы, определяющие поток концентрата установок обратного осмоса.
2. Провести детальный анализ работы комбинированных систем обессоливания воды на основе комбинации процессов обратного осмоса и ионного обмена.
3. Экспериментальным путем установить эффективность способа улучшения качества пермеата установок обратного осмоса, основанного на двухступенчатом удалении углекислоты физико-химическим способом.
4. Разработать и апробировать надежный и обоснованный способ оценки пригодности исходной воды по содержанию коллоидных примесей для подачи на мембраны ОО.

Научная новизна работы состоит 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 по пермеату 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.

Методология и методы исследования. Для достижения цели работы были использованы:

1. Теоретические методы. Анализ литературы, математический анализ уравнения фильтрации воды при определении коллоидного индекса.
2. Расчетные методы. Исследование влияния технологических параметров работы двухступенчатой (по пермеату) установки обратного осмоса на качество получаемого фильтрата, стабильность и количество концентрата при очистке поверхностных вод разного состава путем математического моделирования процесса.
3. Экспериментальные методы. Исследование динамики фильтрования воды разного качества при определении коллоидной нагрузки объемным и весовым методом, исследование динамики десорбции ионов из катионита, работающего на пермеате установки обратного осмоса.
4. Аналитические методы. Определение содержания общей жесткости и углекислоты в воде (титриметрический), определение содержания ионов натрия, кальция, магния, железа (спектрометрия).
5. Экспериментальная установка. Для определения динамики фильтрации воды через тестовую мембрану – на базе емкости, насоса, регулятора давления, корпуса тестовой мембраны, расходомера и датчика веса пробы; для определения динамики

сорбции ионов в комбинированной ВПУ и удаления углекислого газа – на промышленной системе водоподготовки, включающей в себя установки обратного осмоса.

6. Обработка данных. Статистический и графический анализ полученных данных.

Положения, выносимые на защиту:

1. Комплексный подход, включающий влияние гидродинамики, склонности к загрязнению поверхности мембран коллоидными частицами, динамический фактор образования трудно- и нерастворимых минеральных веществ при концентрировании растворов на обратноосмотической мембране. Предложен способ повышения эффективности при проведении обратноосмотических процессов, заключающийся в уменьшении потока образующегося концентрата и, как следствие, более полном использовании исходной воды с увеличением выхода пермеата.

2. Результаты расчетно-экспериментального исследования по определению практических пределов по каждому влияющему фактору на возможное увеличение степени извлечения пермеата обратноосмотической установки с учетом изменяющегося состава воды.

3. Результаты расчетно-экспериментального исследования влияния степени отбора пермеата на изменение его состава, динамику отложения труднорастворимых соединений на поверхности обратноосмотической мембраны, качества пермеата второй ступени обратного осмоса (по пермеату).

4. Математический анализ методики определения коллоидного индекса и качественно иной способ оценки пригодности исходной воды по содержанию коллоидных примесей, математическая модель для описания кинетики фильтрования коллоидных систем, ограничения стандартной методики измерения коллоидного индекса (SDI) и новая методика определения обобщенного коллоидного индекса (ОКИ).

5. Результаты апробирования разработанной методики определения обобщенного коллоидного индекса на воде после разных стадии предварительной очистки, границы практического применения предлагаемого способа.

6. Эффект аномального интенсивного падения потока воды через тестовую мембрану.

7. Высокоэффективный способ декарбонизации воды с умеренно-высокой карбонатной жесткостью в многоступенчатых обратноосмотических установках, основанный на сочетании физического и химического способов удаления растворенной и нерастворенной углекислоты, результаты апробации предложенного способа на промышленных установках.

8. Методические указания и условия регенерации катионитовых фильтров в комбинированных системах обессоливания воды, необходимость применения ступенчатой регенерации катионообменного фильтра в такой системе при использовании серной кислоты в качестве регенеранта.

Достоверность полученных результатов подтверждается использованием стандартных, апробированных в лабораторных и промышленных условиях, современных методов анализа и обработки полученных результатов.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы докладывались на V Международном Водно-Химическом Форуме. (НИУ «МЭИ», г. Москва, 2012 г.), XI и XII международных научно-технических конференциях «Международный водно-химический форум» (г. Минск, 2018 г., 2024 г.), IV международной конференции «Современные проблемы теплофизики и энергетики» (НИУ «МЭИ», г. Москва, 2024 г.).

Публикации. 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, 4 работы в материалах международных конференций.

Содержание и объём 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цели исследования, изложена научная новизна 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 (OARO, CCRO, PFRO, VSEP и др.), приводится принцип их работы, эффективность и области применения.

Во второй главе работы представлен способ увеличения выхода степени отбора фильтрата УОО с мембранными элементами (далее – МЭ) рулонного типа, основанный на соблюдении минимального потока концентрата на выходе из мембранного элемента и максимального потока на входе в элемент для соблюдения необходимой степени турбулизации потока воды над мембраной и соотношения потоков пермеата и исходной воды.

Для рулонных мембранных элементов типоразмера 8040 со средней производительностью 900 л/ч по выражению 1

$$R = \frac{Q_{\text{п}}}{Q_{\text{и}}} * 100 \% \quad (1)$$

где $Q_{\text{и}}$, $Q_{\text{п}}$ – поток исходной воды и пермеата, R – степень отбора фильтрата (не более 15% для УОО первой ступени) поток концентрата должен составлять не менее 5,1 м³/ч. Для одновременного выполнения этих условий в установках малой и средней производительности часто применяют рециркуляцию концентрата. В крупных промышленных установках производительностью свыше 20 м³/ч с общей степенью извлечения 70–75% необходимость в рециркуляции обычно отсутствует, поскольку последовательное соединение большого количества элементов и рабочее давление естественным образом обеспечивают соблюдение всех ограничений по потокам.

Было проведено математическое моделирование рабочих параметров двухступенчатой промышленной УОО, где в качестве критерия оптимизации принято обеспечение минимального расхода концентрата на выходе из последнего МЭ не менее 5,1 м³/ч. Исследование проведено для вод различных солевых составов, характерных для территории РФ и СНГ: р. Волхов (Великий Новгород, общее солесодержание 195,6 мг/л), р. Сочи (г. Сочи, 490,6 мг/л) и оз. Балхаш (г. Балхаш, 1877,6 мг/л). Конфигурация установки: 1-я ступень из 54 мембранных элементов типа КС-8040 С1, собранных в

корпуса по 6 элементов с каскадным соотношением 2:1; 2-я ступень из 42 элементов того же типа, соединенных в каскад в соотношении 5:2.

В ходе моделирования варьировалась R на первой ступени в диапазоне от 65 до 90% при фиксированном значении на второй ступени 85%. Для соблюдения заданного минимального потока в конце каждого корпуса применялась рециркуляция концентрата, параметры которой (расход рециркуляции и конечный поток концентрата) представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Поток рециркуляции и концентрата в УОО первой ступени в зависимости от выхода пермеата

| Выход пермеата, % | Поток рециркуляции концентрата, м ³ /ч | Поток концентрата с торца последнего мембранного элемента, м ³ /ч |
|-------------------|---------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| 65 | 0 | 8,98 |
| 70 | 0 | 7,15 |
| 75 | 0 | 5,56 |
| 80 | 2,6 | 5,10 |
| 85 | 6,3 | 5,10 |
| 90 | 9,5 | 5,10 |

Целью моделирования являлся расчет показателей качества пермеата первой и второй ступени УОО, результаты представлены на рисунке 1.

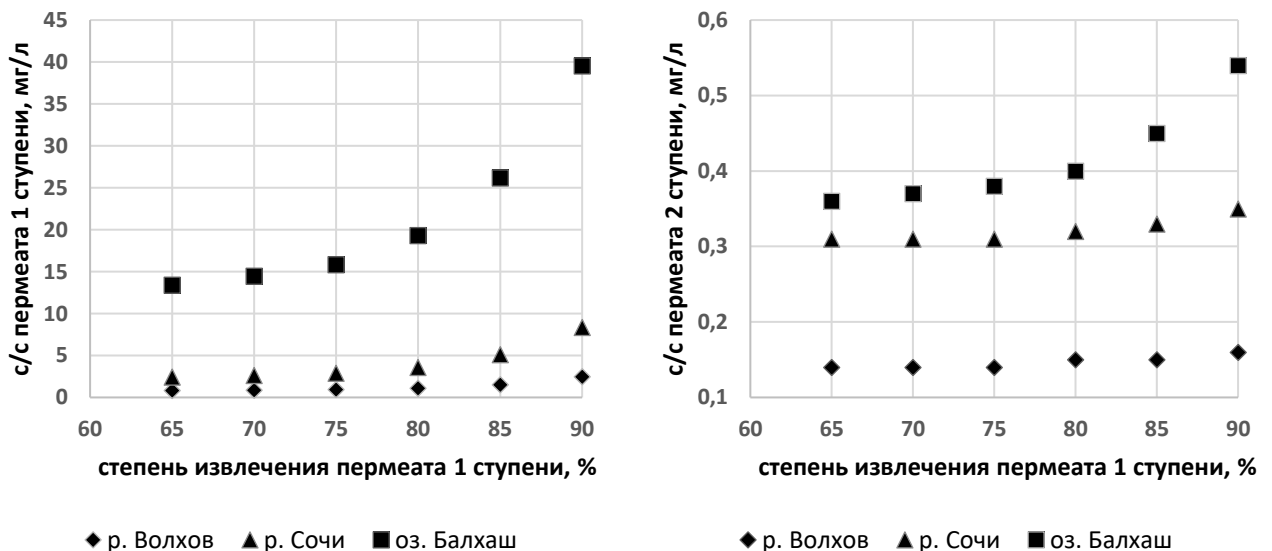


Рисунок 1 - Зависимость солесодержания первой и второй ступени УОО от степени извлечения пермеата первой ступени

На рисунке 1 наблюдается ожидаемый рост солесодержания пермеата как на 1-й, так и на 2-й ступенях очистки по мере увеличения R , особенно после введения рециркуляции.

Особого внимания заслуживает тот факт, что несмотря на существенное возрастание солесодержания пермеата 1-й ступени, абсолютные изменения показателей 2-й ступени остаются в пределах незначительных величин. Наиболее показательным примером служит обработка высокоминерализованной воды оз. Балхаш, где солесодержание пермеата второй ступени возрастает всего с 0,36 мг/л до 0,54 мг/л в полном диапазоне исследуемых значений R . Для воды с меньшей исходной минерализацией изменения качества пермеата 2-й ступени оказываются и вовсе незначительным. Полученные результаты убедительно демонстрируют, что вторая ступень выполняет критически важную функцию стабилизации и нормирования качества обессоленной воды, обеспечивая стабильно высокие показатели очистки независимо от рабочих колебаний и изменений режимов работы первой ступени.

Практическая значимость представленных результатов заключается в установлении реальной возможности существенного сокращения потребления исходной воды - до 20% посредством внедрения рециркуляции концентрата в объеме 10-15% от расхода исходной воды, при этом сохраняя неизменно высокое качество пермеата, и дает сокращение потока отводимого концентрата от УОО на величину до 60%.

При применении предложенного способа увеличения R необходимо учитывать увеличение концентрации труднорастворимых веществ в каналах концентрирования мембран первой ступени – в первую очередь карбоната кальция. Для обобщенной количественной оценки склонности воды к осадкообразованию обычно применяют два показателя – индекс Ланжелье (LSI) при солесодержании воды до 10 г/л и индекс Стиффа и Дэвиса (S & DSI). Для рассматриваемых типов вод (с солесодержанием до 2 г/л) с учетом концентрирования применяется индекс Ланжелье, положительное значение которого показывает, что образование карбоната кальция вероятно и может произойти его осаждение.

Производители ингибитора указывают максимальное рабочее значение LSI не более 2,6. В случае обработки воды ингибитором перед УОО значение индекса рассчитывают в потоке концентрата, т.к. в нем наибольшая концентрация ионов.

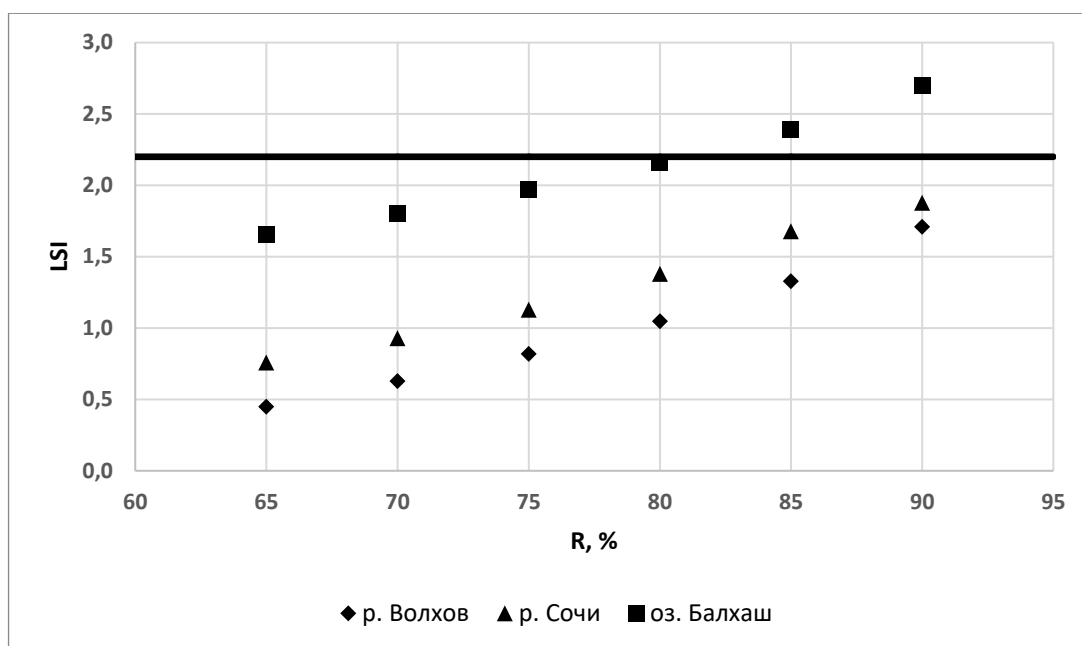


Рисунок 2 - Зависимость индекса Ланжелье (LSI) концентрата первой ступени УОО от выхода пермеата первой ступени УОО

Как видно из рисунка 2, УОО 1-й ступени, работающая на исходной воде из р. Волхов и р. Сочи будет работать стабильно вплоть до значения $R = 90\%$, так как значение LSI в потоке концентрата будет ниже 2.2 ед. (значение взято с запасом относительно максимального) и ингибитор будет предотвращать осадкообразование на поверхности хвостовых мембранных элементов. Та же установка, работающая на исходной воде из оз. Балхаш сможет стабильно работать при степени извлечения фильтрата до $\sim 80\%$.

Следует отметить, что при проведении оценки необходимо учитывать риски образования иных нерастворимых соединений, таких как сульфат кальция, кремниевую кислоту. Концентрация начала осадкообразования кремниевой кислоты при нейтральном pH составляет 100–120 мг/л, что требует дополнительного контроля при работе с высокоминерализованными водами.

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 исходной воды на мембраны ввиду их высокой степени концентрирования в предлагаемом во второй главе способом. За прошедшие 70 лет широкого применения УОО разработаны разные способы оценки этого влияния: Silt density index (SDI,

коллоидный индекс), MFI (Modified Fouling Index, MFI-0.45), SDI+, MFI-UF, CFS-MFIUF, CFI, MMFI.

Общепринятым промышленным стандартом оценки пригодности воды для подачи на обратноосмотические мембраны является SDI (далее – коллоидный индекс, КИ), в первую очередь из-за простоты его определения. Расчет значения производится по уравнению 2

$$\text{КИ}_\tau = \frac{100}{\tau} \left(1 - \frac{t_1}{t_2}\right) \quad (2)$$

где t_1, t_2 – длительность фильтрования пробы воды объемом $V_{\text{пр}} = 500 \text{ см}^3$ до начала и по окончании эксперимента; τ – длительность эксперимента.

Однако, этот метод не имеет обоснованной теоретической основы. При вычислении значения коллоидного индекса не учитывается динамика процесса фильтрации, вместо этого скорость падения принимается равной во время эксперимента и используется только начальная и конечная точка процесса, что в большинстве случаев является очень грубой аппроксимацией. В ряде исследований авторами показано неожиданное поведение коллоидного индекса – при увеличении мутности исходной воды значение индекса понижалось.

Подобное поведение КИ наблюдается и на тестовых растворах формазина, где вместо ожидаемого линейного увеличения КИ при изменении концентрации загрязнителя его значение меняется нелинейно.

Проведя математический анализ уравнения 2 и принимая во внимание уравнение 3

$$N_{\text{кол}} = \theta n_{\text{кол}} \int_0^{t_\phi} Q(t) dt, \quad (3)$$

получим дифференциальное обобщение (уравнение 4)

$$\text{КИ}_\tau \approx -\frac{c}{Q_1} \frac{dQ}{dt}. \quad (4)$$

При $Q_1 \approx Q_{\text{ср}}$ уравнение 4 выглядит следующим образом:

$$\text{КИ}_\tau = -\frac{100}{Q_1} \cdot \frac{dQ}{dt} \sim -\frac{1}{\bar{Q}} \cdot \frac{dQ}{dt} \sim n_{\text{кол}} \quad (5)$$

Это соотношение доказывает, что параметр КИ является хорошим показателем для оценки наличия в воде коллоидных и взвешенных частиц.

Выражение (4) допускает очевидное обобщение:

$$\text{ОКИ}^\zeta = -c(\zeta) \frac{1}{Q} \frac{dQ}{dt} = -c(\zeta) \frac{\Delta Q}{V_\phi} \quad (6)$$

где $s(\zeta)$ - нормировочная константа, ζ - означает рейтинг мембраны, через которую осуществляется фильтрация, $\Delta Q = Q_0 - Q_k$, Q_0 и Q_k - потоки в начале и конце фильтрования воды объёмом V_ϕ , а ОКИ - «обобщенный коллоидный индекс».

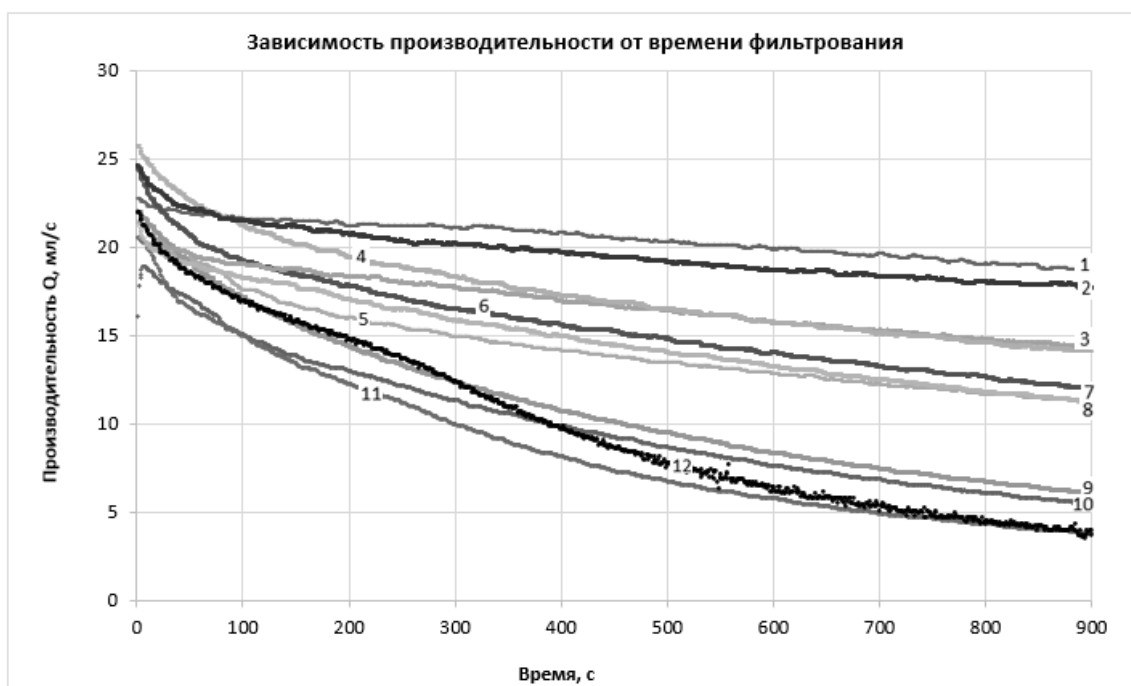
Сравнивая выражения (2) и (6) видно, что константа s для рейтинга фильтрации $\zeta = 0.45$ мкм является связующей между множителем 100 и переводом τ из [с] в [мин] и равно $s = 6000$. При переводе единиц объема в литры получаем выражение (7) для расчета обобщенного коллоидного индекса:

$$\text{ОКИ}_V(V_0) = 6 \frac{\Delta Q}{\Delta V} \quad (7)$$

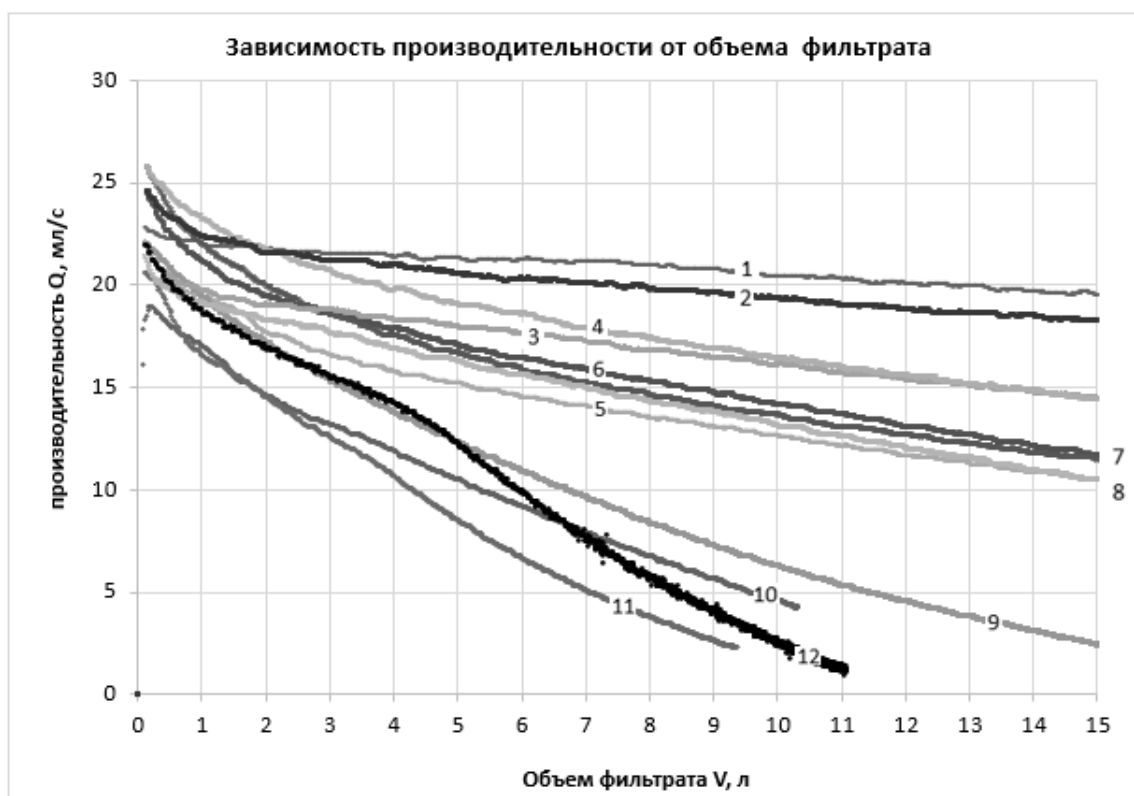
где $\Delta Q = Q(V_0) - Q(V_0 + \Delta V)$ - разность расходов воды и объемов $\Delta V = V_k - V_0$ в начале и конце фильтрования. V_0 - объем фильтрата в начальный момент измерения до установления линейной зависимости $Q(V)$.

Значение $\text{SDI}_{15} < 5$ означает изменение производительности тестовой мембраны не более, чем на 5% за 1 мин., если принять это условие как критерий приемлемости воды по коллоидной нагрузке, то предельное значение обобщенного коллоидного индекса воды должно быть $\text{ОКИ} < 5.13$ ед.

Для апробации представленного подхода была собрана экспериментальная установка, в которой регистрировался объем, поток фильтрата и время фильтрования через тестовую микрофильтрационную мембрану 47 мм 0,45 мкм при давлении 2,1 бар, на которую подавали воду разного качества - водопроводную (№11 и №12), после фильтра обезжелезивания (№9 и №10), смесь пермеата УОО и исходной воды 1:1 (№8), 2:1 (№6 и №7), 3:1 (№4 и №5), пермеат УОО (№2 и №3), пермеат УОО дважды пропущенный через тестовую микрофильтрационную мембрану (№1). Получены следующие зависимости (рисунок 3):



(а)



(б)

Рисунок 3 - Зависимость производительности тестовой мембраны от времени фильтрования (а) и объема фильтрата (б)

Таблица 2 - Значения ОКИ, SDI и MFI

| № | ОКИ | SDI ₁₅ (50) | MFI, с/л ² |
|----|-------|------------------------|-----------------------|
| 1 | 0,84 | 1,05 | 0,03 |
| 2 | 1,74 | 1,31 | 0,92 |
| 3 | 2,16 | 1,85 | 1,02 |
| 4 | 3,72 | 2,52 | 2,14 |
| 5 | 2,88 | 2,75 | 2,73 |
| 6 | 3,3 | 2,79 | 2,41 |
| 7 | 4,5 | 2,75 | 2,60 |
| 8 | 3,42 | 3,03 | 2,92 |
| 9 | 9,12 | 4,64 | 7,49 |
| 10 | 7,8 | 4,69 | 10,67 |
| 11 | 11,04 | 5,29 | 11,60 |
| 12 | 8,28 | 5,74 | 5,66 |

По данным расчетов (таблица 2) видно, что вода из экспериментов №№ 9-12 не подходит для подачи воды на обратноосмотические мембраны по ранее установленному критерию $ОКИ \leq 5.13$, что для проб воды с составом №№ 11-12 подтверждается значением SDI₁₅. Для дополнительной проверки были рассчитаны значения модифицированного индекса загрязнений MFI, как и значения ОКИ, для проб воды №№ 9-12 показали непригодность для подачи на обратноосмотические мембраны (критерий пригодности $MFI \leq 4$ с/л²). Из чего можно сделать вывод, что оценка пригодности воды по значению обобщенного коллоидного индекса ОКИ является более точной, чем привычная оценка по значению SDI₁₅.

По полученным зависимостям подтверждено нелинейное протекание процесса фильтрации воды через тестовую мембрану, что подтверждает изначальное предположение о том, что стандартная методика определения коллоидного индекса SDI₁₅ является грубой аппроксимацией зависимости $Q(t)$ и чем больше коллоидных частиц в воде, тем грубее такая аппроксимация.

Проведено сравнение экспериментально полученных значений коллоидного индекса по стандартной методике и обобщенного коллоидного индекса, определённых по расходомеру и по объёму фильтрата, которое показало среднее расхождение между полученными значениями SDI₅, SDI₁₀, SDI₁₅, ОКИ составляет не более $\pm 5\%$, что является допустимым отклонением в практическом применении. Это позволяет с уверенностью

использовать приборы для измерения мгновенного объемного расхода для определения значений коллоидных индексов воды в установках с меньшими габаритами и большей устойчивостью к внешним воздействиям, нежели чем при определении индексов по накопленной массе фильтрата.

Обнаружено резкое падение производительности тестовой мембраны в первоначальный период фильтрации на всех испытанных образцах воды, которое вносит существенный вклад в итоговое значение коллоидного индекса воды SDI_5 , SDI_{10} , SDI_{15} (до 2,05 для SDI_5 и до 0,54 для SDI_{15}), что не учитывается стандартной методикой измерения. Проведено сравнение значений SDI_{15} при смещении начала измерений в диапазоне от 0 до 100 сек. для двух разных типов вод и установлено, что стабилизация значений в пределах $\pm 2\%$ происходит через 30-40 сек от начала измерений. Предложено модифицировать стандартную методику измерения коллоидного индекса SDI для учета наблюдаемого явления 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 обратного осмоса (далее – ОО) и ионного обмена (далее – ИО). Одноступенчатые системы УОО, обеспечивающие степень обессоливания 98-98,5%, применяются для частичного удаления солей. Характерные значения удельной электропроводности (далее - УЭП) пермеата таких установок составляют 15-20 мкСм/см при обработке воды с исходной УЭП 500-700 мкСм/см, чего недостаточно для многих современных технологических процессов.

Для получения обессоленной воды с УЭП менее 1 мкСм/см применяют несколько способов, в числе которых очень распространены комбинированные системы обессоливания с мембранными установками на первых ступенях и ионообменные фильтры для глубокого обессоливания полученной воды. Ключевым технологическим преимуществом комбинированных систем является оптимальное распределение стадий очистки: обратноосмотические мембраны удаляют 98-99% растворенных солей из исходной воды, в то время как на долю ионообменной стадии приходится всего 1-2% солей. Такое распределение солевой нагрузки позволяет значительно сократить объемы используемых химических реагентов и уменьшить количество сточных вод, образующихся в процессе регенерации.

В одной из промышленных комбинированных систем был выполнен анализ состава поглощенных ионов в пробе катионита объемом 5 л, отобранной из катионитового фильтра перед плановой регенерацией после обнаружения проскока ионов натрия.

Для количественного определения общего содержания ионов жесткости, поглощенных катионитом, проводили регенерацию образца смолы 10% соляной кислотой в направлении снизу-вверх в 4-х кратном избытке для вытеснения максимального количества ионов и исключения риска образования нерастворимых осадков. В процессе измерений отбирали пробы на выходе из экспериментальной колонки через каждые 0,5 колоночных объема и измеряли в них концентрацию ионов кальция, магния, натрия и железа при помощи атомно-абсорбционного спектрометра. Динамика десорбции и количество вытесненных ионов приведено на рисунке 4.

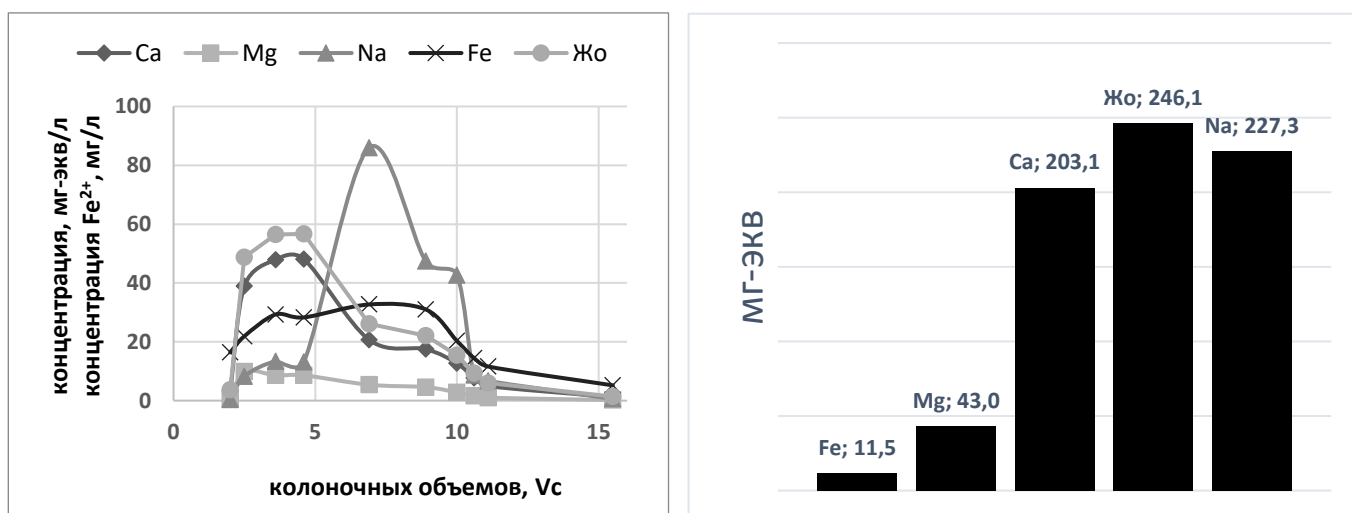


Рисунок 4 - Выходные кривые регенерации катионита в промышленном фильтре и количество вытесненных ионов

Проведенный анализ демонстрирует существенные различия в работе ионообменных фильтров при использовании традиционных и комбинированных систем обессоливания, что обусловлено существенным изменением ионного состава воды после мембранных ступеней очистки. В традиционных схемах обработки поверхностных вод характерное соотношение эквивалентов ионов натрия и жесткости составляет 1:(4-6), тогда как в комбинированных системах после двухступенчатого ОО это соотношение изменяется до 1:(1-1,5). Данное изменение кардинально влияет на характер работы катионитовых фильтров: в комбинированных системах катионит поглощает значительное количество ионов жесткости (до 30-40% от общей емкости), в отличие от традиционных Н-фильтров второй ступени, где преимущественно происходит поглощение ионов натрия (85-90%). Это обуславливает необходимость применения иного подхода к регенерации ионообменных смол.

Для предотвращения загипсовывания катионообменной смолы в комбинированных системах обессоливания необходимо ступенчатое проведение

регенерации серной кислотой с начальной концентрацией не более 1,5% и последующей подачей 4-6% раствора кислоты для полного восстановления обменной емкости. При техническом перевооружении для катионитовых фильтров в комбинированных ВПУ необходимо определять дозу регенеранта, достаточную для вытеснения ионов жесткости вместо использования нормативных значений ввиду возможной неоптимальной конструкции фильтра в новом месте технологической цепочки. Для оптимизации работы таких систем рекомендуется организация непрерывного мониторинга остаточной жесткости после мембранных ступеней очистки воды, периодический лабораторный анализ состава регенерационных потоков для корректировки параметров регенерации, периодический анализ состава поглощенных катионитом ионов.

В пятой главе работы рассматривается влияние растворенной в воде углекислоты на качество ОО пермеата. Углекислый газ, присутствующий в воде, свободно проникает через полупроницаемые мембраны благодаря своей низкой молекулярной массе и отсутствию заряда. Ионизированные формы углекислоты в воде хорошо задерживаются обратноосмотической мембраной, в то время как растворенный углекислый газ свободно проходит через неё.

Даже невысокое содержание углекислоты, порядка 2-3 мг/л, на 1,5-2 мкСм/см, увеличивает электропроводность воды. При общей щелочности исходной воды более 3 мг-экв/л содержание углекислоты в пермеате УОО 1-й ступени может достигать 15-20 мг/л и выше. Если целью системы водоподготовки является получение глубоко обессоленной воды, то после первичного обессоливания на УОО предусматривают ИО или установки электродеионизации и углекислота в пермеате будет являться основной ионной нагрузкой на этих стадиях.

Для удаления CO_2 могут быть применены физические и химические методы. Первые основаны на создании развитой поверхности массообмена и/или изменении давления над поверхностью воды или на изменении растворимости углекислоты при нагреве воды. Химические методы основаны на связывании углекислоты реагентами – щелочами, аминами и проч.

Для исследования эффективности физического способа декарбонизации на вакуумно-эжекционных аппаратах несколько промышленных двухступенчатых УОО были дооснащены вакуумно-эжекционными аппаратами производства АО «НПК Медиана-Фильтр» подходящей производительности. При рабочем давлении аппаратов 2,5 атм. коэффициент инжекции воздуха составляет 25:1. Декарбонизаторы были установлены на бак пермеата 1-й ступени, были получены следующие данные (таблица 3).

Таблица 3 - Значения концентраций CO_2 в воде после ее обработки методами ОО и эжекционно-струйной декарбонизации

| | Система №1 | Система №2 | Система №3 |
|------------------------------------------------------------|------------|------------|------------|
| Концентрация CO_2 в воде после 1-ой ступени осмоса, мг/л | 20 | 30 | 50 |
| Концентрация CO_2 в воде после декарбонизатора | 2.7 | 3.2 | 3.5 |

Эффективность декарбонизации находится в прямой зависимости от исходной концентрации растворенной углекислоты в фильтрате и конструктивных особенностей декарбонизационного аппарата. Достижение глубокой степени удаления CO_2 (≤ 1 мг/л) с использованием распространенных аппаратов, таких как пленочные и эжекционно-струйные декарбонизаторы, сопряжено со значительными техническими сложностями и требует проведения специализированных исследований и разработки оптимизированных конструктивных решений.

В практических условиях применение указанных методов часто не позволяет достичь требуемых показателей электропроводности пермеата $\mu_{пр}$, из-за повышенного остаточного содержания CO_2 . В этом контексте мембранная дегазация демонстрирует высокую технологическую эффективность, обеспечивая снижение концентрации углекислоты до значений менее 1 мг/л. Однако внедрение этой технологии сопровождается существенными капитальными и эксплуатационными затратами, что ограничивает её широкое применение в промышленных масштабах.

Содержание углекислоты тесно связано с щёлочностью воды и может быть описано выражением (8):

$$[CO_2] = [HCO_3^-] / 10^{pH-6.35} \quad (8)$$

из которого видно, что повышение рН (например, дозированием натриевой или калиевой щелочи) до уровня 8.35 единиц понижает содержание углекислоты в сто раз и делает его очень низким. Ионы, образующиеся при дозировании щелочи Na^+ , K^+ , HCO_3^- и CO_3^{2-} , эффективно удаляются второй ступенью УОО. Этот способ, часто обозначаемый как «химическая декарбонизация», является самым простым и дешевым методом как по капитальным, так и по эксплуатационным затратам.

Для высокоэффективного удаления CO_2 в ВПУ на основе двухступенчатых УОО было исследовано 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.

Таблица 4 - Параметры качества воды на разных ступенях обработки

| Параметр | Производственная площадка | | | |
|-------------------------------------------------------|---------------------------|-------|-------|-------|
| | №1 | №2 | №3 | №4 |
| Электропроводность исходной воды, мкСм/см | 170 | 410 | 220 | 1600 |
| рН исходной воды | 6.7 | 7.7 | 6.9 | 8.3 |
| Концентрация CO_2 перед декарбонизатором, мг/л | 9.0 | 10 | 16.2 | < 0,1 |
| Концентрация CO_2 после декарбонизатора, мг/л | 2.5 | 3.0 | 2.8 | н.о. |
| Концентрация CO_2 после второй ступени УОО, мг/л | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 | < 0,1 |
| Электропроводность фильтрата Д-УОО, мкСм/см | 0.5 | 0.8 | 0.6 | 1.2 |

Результаты, представленные в таблице 4, показывают, что комбинация физического удаления углекислоты на эжекционно-струйных аппаратах после установок первой ступени ОО и химического путем подщелачивания частично обессоленной воды перед УОО второй ступени позволяет достичь стабильного качества обессоленной воды с $\mu_{пр}$ менее 1.5 мкСм/см, даже если на вход двухступенчатой УОО поступает вода с электропроводностью 1600 мкСм/см. Вода такой степени очистки по качеству подходит для подпитки котлов с естественной циркуляцией давлением 13,8 МПа, на которые необходимо подавать воду с удельной электропроводностью $\mu_{пр}$ менее 2.0 мкСм/см.

Сравнительный расчет эксплуатационных затрат на реагенты в системах: двухступенчатого ОО (система №1), двухступенчатого ОО с вакуумно-эжекционной декарбонизацией перед второй ступенью УОО (система №2) и двухступенчатого ОО с вакуумно-эжекционной декарбонизацией и вводом щелочи перед второй ступенью УОО

для глубокого удаления углекислоты (система №3) показывает, что система №2 даёт в 5 раз большую нагрузку на последующую стадию ИО, а система №1 - более чем в 14 раз.

Результаты апробации и расчетов наглядно демонстрируют преимущества предлагаемого нового комплексного подхода к построению системы двухступенчатого ОО по пермеату с двухступенчатым удалением углекислоты на основе комбинации физического и химического способов в виде получения частично обессоленной воды высокого качества даже после двухступенчатого ОО и существенной экономии реагентов при эксплуатации системы глубокого обессоливания фильтрата двухступенчатый систем ОО.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам выполненных исследований сформулированы следующие **выводы:**

1. Предложенный способ безреагентного уменьшения количества концентрата УОО непрерывного типа путем поддержания необходимой гидродинамики и предотвращения формирования осадков труднорастворимых веществ позволяет увеличить выход фильтрата до 80% при солесодержании исходной воды 1877,6 мг/л, а при 195 мг/л - 92%, что дает приводит к уменьшению количества образующегося концентрата на величину от 20% до 60% в зависимости от солесодержания исходной воды.

2. Разработанная впервые методика определения обобщенного коллоидного индекса ОКИ апробирована на воде с разным содержанием коллоидных частиц, по итогам которой 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.

3. Обнаружено резкое падение производительности тестовой мембраны в первоначальный период фильтрации на всех испытанных образцах воды, которое вносит существенный вклад в итоговое значение коллоидного индекса воды SDI. Экспериментальным путем показано, что сдвиг начала измерений на 50 сек от момента подачи пробы на тестовую мембрану существенно повышает точность измерений по стандартной методике.

4. Результаты химического анализа регенерационного раствора катионообменного фильтра, работающего на доочистке пермеата УОО показали, что катионит в такой схеме поглощает значительное количество ионов жесткости (до 30-40%

от общей емкости), в отличие от традиционных Н-фильтров второй степени, где преимущественно происходит поглощение ионов натрия (85-90%). Эта особенность работы требует проведения ступенчатой регенерации ионообменных фильтров для исключения загипсовывания загрузки.

5. Предложенный способ увеличения качества фильтрата двухступенчатых УОО, основанный на двухступенчатом удалении растворенной углекислоты физическим и химическим способом, дает возможность получения пермеата с УЭП менее 1 мкСм/см при солесодержании исходной воды до 1 г/л и обеспечивает экономию до 14 раз на реагентах для регенерации ионообменных фильтров в комбинированных системах глубокого обессоливания воды.

В качестве перспективного направления развития работы предлагается рассмотреть применение предложенного способа сокращения количества концентрата на водоисточниках с общим солесодержанием до 5 г/л для применения в западной и юго-западной части РФ, в южных странах СНГ.

Вторым направлением развития темы может быть исследование применения ОКИ как метода оценки качества воды на разных стадиях очистки воды в системах водоподготовки.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ

Публикации в рецензируемых изданиях:

1. Pantelev A. A. Treatment of Makeup Water for Drum Boilers by the Two-Stage Reverse Osmosis / A. A. Pantelev, **A. A. Smirnov**, V. B. Smirnov // Thermal Engineering. 2019. V. 66. № 6. P. 450-456. (**Scopus, Web of Science**)
2. Pantelev A. A. New Method For Measuring Colloidal Index / A. A. Pantelev, **A. A. Smirnov**, V. B. Smirnov, V. P. Kovalenko // Thermal Engineering. 2021. Vol. 68. N. 9, P. 723-729. (**Scopus, Web of Science**)
3. **Смирнов А.А.** Обзор безреагентных методов уменьшения количества концентрата установок обратного осмоса / **А.А. Смирнов**, В.Б. Смирнов // Мембраны и мембранные технологии. 2025. т. 15, № 1, с. 76-86 (**Chemical Abstracts**)

Публикации в прочих изданиях:

4. **Смирнов А.А.** Повышение эффективности двухступенчатых установок обратного осмоса / А.А. Смирнов, В.Б. Смирнов // Новое в российской электроэнергетике. 2024. № 7. С. 24. (РИНЦ)

5. **Смирнов А.А.** Особенности эксплуатации комбинированных систем обессоливания воды / **А.А. Смирнов**, В.Б. Смирнов, С.Ю. Ларионов, А.А. Пантелеев // Новое в российской электроэнергетике. 2025. № 2. С. 16 (РИНЦ)

Публичные доклады на всероссийских и международных научных мероприятиях:

1. Календарев Р.Н., **Смирнов А.А.** Проектирование ВПУ с применением каскадного концентрирования стока с установки обратного осмоса. V Международный Водно-Химический Форум. НИУ «МЭИ». 3 – 6 апреля 2012 г., г. Москва (Устный)

2. Ларионов С.Ю., Пантелеев А.А., Смирнов В.Б., Бобинкин В.В., **Смирнов А.А.** Особенности режимов работы комбинированных систем водоподготовки // Сборник материалов XI Международного водно-химического форума, 22-25 мая 2018 г., Минск : Институт физико-органической химии НАН Беларуси, 2018, С. 95.

3. **Смирнов А.А.**, А.А. Пантелеев, Смирнов В.Б. Коллоидный индекс. Методологические заметки. // Сборник материалов XI Международного водно-химического форума, 22-25 мая 2018 г., Минск : Институт физико-органической химии НАН Беларуси, 2018, С. 157.

4. **Смирнов А.А.**, Смирнов В.Б. Повышение эффективности установок обратного осмоса. // [Электронный ресурс] – URL: <https://ifoch.by/wp-content/uploads/2024/05/mvhf-2024-sbornik-materialov.pdf>. Минск : Институт физико-органической химии НАН Беларуси , 2024. Сборник материалов XII Международного водно-химического форума, 21-24 мая 2024 г., Минск : Институт физико-органической химии НАН Беларуси, 2024, С. 68-71.

5. **Смирнов А.А.**, Чудова Ю.В, Смирнов В.Б. Повышение эффективности установок обратного осмоса на ТЭС. IV Международная конференция «Современные проблемы теплофизики и энергетики». // Материалы IV Международной конференции «Современные проблемы теплофизики и энергетики» (СПТЭ). Москва, 21-25 октября 2024 г. – М.: Издательство МЭИ, 2024. С. 417-418