

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

На правах рукописи



Хтет Аунг

**Разработка технологии получения воды питьевого качества
из подземных источников Мьянмы**

2.6.15. Мембраны и мембранная технология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева» на кафедре мембранной технологии.

Научный руководитель: **Каграманов Георгий Гайкович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой мембранной технологии ФГБОУ ВО РХТУ им. Д. И. Менделеева

Официальные оппоненты: **Плиско Татьяна Викторовна**, доктор химических наук, доцент, заведующая лабораторией мембранных процессов Государственного научного учреждения «Институт физико-органической химии Национальной академии наук Беларуси»

Тимкин Виктор Андреевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «пищевая инженерия аграрного производства» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уральский государственный аграрный университет» (ФГБОУ ВО Уральский ГАУ)

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет» (ФГБОУ ВО «КНИТУ»)

Защита состоится «30» июня 2025 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.muctr.ru/university/departments/ods/inhouse/inhouse_announcements/

Автореферат разослан « ____ » _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного Совета РХТУ 2.6.08
кандидат технических наук



Атласкин А. А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Чистая питьевая вода является жизненно важным ресурсом для человечества. Однако в условиях быстрого роста населения и индустриализации потребность в качественной питьевой воде стремительно возрастает. Около 97% водных ресурсов Земли составляют океанические воды, непригодные для потребления человеком и сельскохозяйственного использования. Лишь менее 3% всей воды на планете доступны для питьевых и хозяйственных нужд.

Республика Союз Мьянма обладает значительными водными ресурсами, однако их качество нередко не соответствует санитарным нормам. Это оказывает неблагоприятное влияние на здоровье населения и состояние экосистем страны. Подземные воды, которые во всем мире считаются надежным источником водоснабжения, в Республике Союз Мьянма подвергаются загрязнению, что делает их непригодными для питья без предварительной очистки. Употребление неочищенной воды может представлять угрозу для здоровья граждан.

В последние десятилетия в городских районах Республики Союз Мьянма было достигнуто значительное улучшение качества питьевой воды благодаря внедрению централизованных систем водоочистки и распределению очищенной воды через подземные трубопроводные сети. Однако в сельских районах Республики Союз Мьянма доступ к безопасной питьевой воде остается серьезной проблемой. Создание централизованных систем водоочистки в этих районах экономически нецелесообразно из-за высоких капитальных затрат и недостаточно развитой инфраструктуры. Поэтому для улучшения качества питьевой воды в сельской местности необходимы инновационные, энерго- и ресурсосберегающие технологии очистки воды.

Перспективным направлением для решения данной проблемы является применение баромембранных технологий водоочистки. Традиционные методы, такие как механическая фильтрация, отстаивание и коагуляция, не всегда обеспечивают достаточное удаление загрязняющих веществ. В ряде случаев они не позволяют привести качество воды в соответствие с современными санитарными стандартами. Баромембранные процессы являются эффективной альтернативой традиционным методам очистки. Они обладают рядом преимуществ: относительно низкие капитальные затраты, короткий срок окупаемости, простота в эксплуатации и высокая степень автоматизации.

Принцип их действия заключается в фильтровании растворов под давлением через мембраны, пропускающие молекулы растворителя и, полностью или частично, задерживающие молекулы либо ионы растворенных веществ. Баромембранные процессы широко используются в различных отраслях промышленности и они играют все более важную роль в водоподготовке. Данная работа, посвящена разработке научно обоснованных технологических решений для интенсификации процессов очистки подземных вод методами ультрафильтрации (УФ) и обратного осмоса (ОО), что весьма актуально для Республики Союз Мьянма.

Цель работы заключается в разработке технологии получения воды питьевого качества из подземных источников, а также в исследовании эффективности баромембранных процессов (ультрафильтрация и обратный осмос) и, на их основе, разработка технологической схемы системы очистки воды.

Задачи работы.

Для достижения представленной цели были решены следующие задачи:

- Повышение эффективности мембранной системы за счет предварительной окислительной обработки и обеспечение оптимальной эффективности очистки.
- Оценка эффективности ультрафильтрационных мембран и выяснения того, как технологические параметры влияют на удельную производительность и селективность разделения этих мембран.
- Изучение влияния технологических параметров на удельную производительность и селективность обратноосмотических мембран при очистке модельных растворов подземных вод.
- Изучение взаимосвязи мембрана-раствор в зависимости от природы исходного раствора и технологических параметров мембранного процесса.
- Технико-экономический анализ процесса очистки подземных вод на основе мембранных методов.

Научная новизна.

1. Научно обоснована и разработана стадия предподготовки воды ультрафильтрацией за счет использования предварительной окислительной обработки и обеспечения максимальной эффективности фильтрации.

2. Получены новые экспериментальные и расчетные данные для разработки процессов очистки подземных вод Республики Союз Мьянма с использованием

баромембранных методов, таких как ультрафильтрация и обратный осмос, что позволило получить важную информацию о технологических аспектах процессов разделения при очистке воды.

3. Исследованы эксплуатационные характеристики ультрафильтрационных мембран для двухкомпонентных систем при разделении растворов, в которых содержатся ионы железа и марганца. Установлено, что при наличии в растворе двух типов ионов происходит их ионная конкуренция и электростатические взаимодействия, что повышает эффективность разделения. При наличии определенного иона можно улучшить удаление другого за счет синергетического эффекта.

Теоретическая и практическая значимость работы состоит в том, что:

1. Разработана методика расчета баромембранных установок с использованием полуволоконных мембран для ультрафильтрации и рулонных мембранных элементов для обратного осмоса.

2. Разработаны способы получения питьевой воды при конструктивной простоте и малых энергетических затратах, которые позволяют достичь высокой степени очистки, сопоставимой с качеством вод, прошедших глубокую многостадийную очистку.

3. Проведен технико-экономический анализ, позволяющий минимизировать затраты на очистку солоноватых подземных вод с использованием совмещенной системы ультрафильтрации (УФ) и обратного осмоса (ОО) для получения чистой воды.

4. Предлагаемая технология с применением совмещенных схем на основе ультрафильтрации (УФ) и обратного осмоса (ОО) позволяет получить подходящую чистую воду хорошего качества, и повысить энерго- и ресурсосбережение на предприятиях водоподготовки.

Методология и методы исследования. Для достижения цели работы были использованы: расчетные и экспериментальные методы исследования влияния технологических параметров на основные характеристики ультрафильтрационных и обратноосмотических мембран (удельную производительность и селективность) при очистке модельных растворов подземных вод. Для определения физико-химических показателей воды до и после очистки использовались атомно-абсорбционный

спектрометр "КВАНТ-2А" (в ЦКП РХТУ им. Д.И. Менделеева), анализаторы (ТДС-метр и рН-метр) и комплексонометрическое титрование.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты исследования ультрафильтрационной очистки с предварительной окислительной обработкой для удаления соединений железа и марганца в однокомпонентных, двухкомпонентных и многокомпонентных системах модельных растворов.

2. Результаты исследования процесса обратного осмоса при удалении ионов жесткости и солености в одно- и многокомпонентных системах модельных растворов.

3. Техничко-экономический анализ процесса очистки подземных вод для получения воды питьевого качества на основе совмещенной системы ультрафильтрации (УФ) и обратного осмоса (ОО).

Степень достоверности результатов. Достоверность полученных результатов обеспечивается применением современных экспериментальных методов, строгим соблюдением методологии исследования и многократной повторяемостью опытов. Сравнение экспериментальных данных с теоретическими моделями, а также их согласованность с результатами, представленными в научной литературе, подтверждает надежность полученных выводов.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы представлены на международных конференциях: XXXVI Международная конференция молодых ученых по химии и химической технологии (Москва, 2022 г.), XXXVII Международная конференция молодых ученых по химии и химической технологии (Москва, 2023 г.), XX Международная научно-практическая конференция «Наука, образование, производство для противодействия техногенным угрозам и решению экологических проблем» (Техносферная безопасность - 2023) (Уфа, 2023 г.), Международная научно-практическая конференция «Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность» (Севастополь, 2023 г.), Международная научно-техническая конференция "Экология и техносферная безопасность» (Сочи, 2024 г.), XII Международный водно-химический Форум (Минск, Республика Беларусь, 2024 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 12 печатных работ, в том числе 4 из них в журналах, индексируемых в международных базах данных (Scopus, GeoRef и Chemical Abstracts). Результаты научного исследования подтверждены участием на

научных мероприятиях всероссийского и международного уровня: опубликовано 8 работ в материалах всероссийских и международных конференций.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Общий объем работы 131 страница, включая 26 рисунков, 17 таблиц, библиографию из 115 наименований и приложение.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, поставлена цель и сформулированы задачи, которые необходимо решить для ее достижения, изложена научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе обобщены теоретические аспекты и методы очистки воды, с акцентом на баромембранные процессы. Рассмотрены различные источники питьевой воды, включая подземные воды, и выявлены основные причины их загрязнения. Особое внимание уделено перспективам устойчивой очистки подземных вод, включая современные методы обеззараживания и предварительной обработки в баромембранных системах.

Во второй главе обозначены объекты исследования УФ и ОО, представлены методики проведения экспериментов и анализа, описаны конструкции используемых аппаратов и установок на их основе.

В качестве объектов исследования были выбраны ультрафильтрационный мембранный модуль производства ООО «Текон МТ» и обраноосмотический мембранный модуль Desal TFM-75 NT (GE Osmonics).

Исследования проводили с использованием модельных растворов солей металлов с соответствующей концентрацией подземных вод 3 регионов Республики Саха (Якутия). Концентрацию металлов измеряли методом атомноабсорбционной спектроскопии (выполнены в ЦКП РХТУ им. Д.И. Менделеева) и комплексонометрического титрования.

Эксперименты по влиянию основных технологических параметров на характеристики процессов УФ и ОО проводили на лабораторных установках кафедры мембранной технологии РХТУ им. Д.И. Менделеева.

В третьей главе приведены результаты исследований влияния рабочего давления, времени фильтрации, температуры и концентрации исходного раствора на

удельную производительность и селективность разделения УФ и ОО мембран при очистке модельных однокомпонентных, двухкомпонентных и многокомпонентных растворов.

На первоначальном этапе исследования, перед проведением экспериментов по мембранным процессам, была выполнена предподготовка воды с использованием реагентного окисления. В процессах водоподготовки окисление реагентами является важнейшим этапом предварительной обработки, направленным на превращение растворимых ионов железа (Fe^{2+}) и марганца (Mn^{2+}) в их дисперсные формы (оксиды Fe^{3+} и Mn^{4+}). Этот процесс играет важную роль, так как уменьшает высокое содержание ионов железа и марганца, что способствует повышению эффективности ультрафильтрации. В данной работе для окисления ионов Fe^{2+} и Mn^{2+} до нерастворимых форм применяли химические реагенты: гипохлорит натрия (NaClO) и перманганат калия (KMnO_4). Перед этапом ультрафильтрации был проведен процесс механической фильтрации для удаления дисперсных частиц из пробы воды. В приведенной ниже таблице представлены данные о концентрации ионов металлов в исходной воде до предподготовки воды и в очищенной воде после ее проведения.

Таблица 3.1 – Концентрации ионов многокомпонентных модельных растворов до и после предподготовки воды

Ионы	Исходные концентрация, мг/л (до предподготовки)			Концентрация, мг/л (после предподготовки)		
	1-й состав	2-й состав	3-й состав	1-й состав	2-й состав	3-й состав
Fe^{2+}	14	10	8,25	1,12	0,8	0,66
Mn^{2+}	11,5	8,5	5,5	0,92	0,85	0,44
Ca^{2+}	226,4	731,4	591,2	226,4	731,4	591,2
Mg^{2+}	434,5	407,1	66,84	434,5	407,1	66,84
Na^+	2075	2117	1437	2075	2117	1437

В результате предварительной обработки установлено, что содержание железа и марганца снизилось на 90–92 % от исходной концентрации, что может повысить эффективность этапа ультрафильтрации.

Ультрафильтрация является надежным методом удаления соединений железа и марганца благодаря высокой эффективности и низким эксплуатационным затратам. Ультрафильтрация также повышает эффективность обратного осмоса, снижая загрязнение мембран и продлевая их срок службы. Для оптимизации процесса

необходимы исследования, оценивающие загрязнение мембраны, производительность и селективность разделения. Анализ механизмов удаления этих соединений позволяет уточнить параметры процесса, повышая надежность очистки подземных вод. В данной работе исследование процессов ультрафильтрации проводилось с целью установления зависимости основных характеристик мембранных процессов от факторов, влияющих на процессы разделения при очистке воды.

Исследование характеристик ультрафильтрационных мембран для однокомпонентных систем имеет решающее значение для получения базового представления о том, как отдельные ионы, такие как Fe^{3+} и Mn^{4+} , взаимодействуют с мембраной в контролируемых условиях. Кроме того, важно понимать основные механизмы взаимодействия мембраны и раствора (система “мембрана-раствор”), в том числе то, как свойства растворенных веществ и характеристики поверхности мембран влияют на задержание ионов. Эти фундаментальные знания имеют решающее значение для точной оценки эффективности процессов очистки сложных многокомпонентных систем и разработки целенаправленных технологий очистки воды, адаптированных к конкретным загрязнителям.

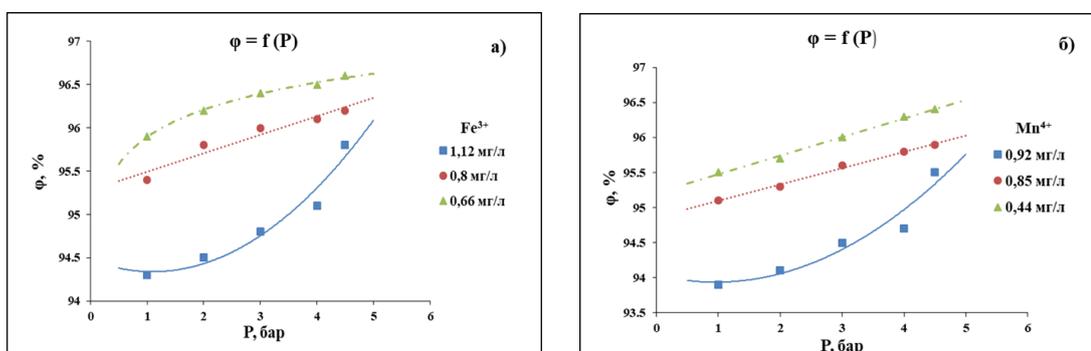


Рисунок 3.1 – Зависимость селективности исследуемых УФ мембран от рабочего давления при очистке модельных растворов (а) FeCl_2 (б) MnSO_4

$$T = 20^\circ\text{C} \pm 1 ; \text{pH} = 7 \pm 0,5$$

Результаты анализа водных растворов FeCl_2 и MnSO_4 указывают на прямую зависимость между повышением давления и увеличением селективности для всех тестируемых концентраций железа (1,12 мг/л, 0,8 мг/л и 0,66 мг/л) и марганца (0,92 мг/л, 0,85 мг/л и 0,44 мг/л). Значения селективности (ϕ) при очистке каждого раствора постепенно увеличивались с увеличением давления, при этом при очистке растворов с наименьшей концентрацией железа (0,66 мг/л) и марганца (0,44 мг/л) последовательно достигались самые высокие значения селективности, в то время как при очистке

растворов с наибольшей концентрацией железа (1,12 мг/л) и марганца (0,92 мг/л) наблюдались самые низкие значения селективности. Из представленных данных видно, что величина селективности разделения обратно пропорциональна концентрации ионов, что указывает на влияние концентрационной поляризации. В результате установлено, что при очистке растворов с повышенной концентрацией железа и марганца показываются сниженные значения селективности разделения, несмотря на неизменное значение давления. Теоретические представления подтверждают этот результат, поскольку концентрационная поляризация, как правило, снижает вероятность задержания за счет увеличения обратной диффузии. Это явление особенно актуально для ультрафильтрационных мембран при высоких концентрациях ионов в воде важно контролировать поляризацию путем обратной промывки или регулирования расхода, обеспечивая оптимальную селективность очистки.

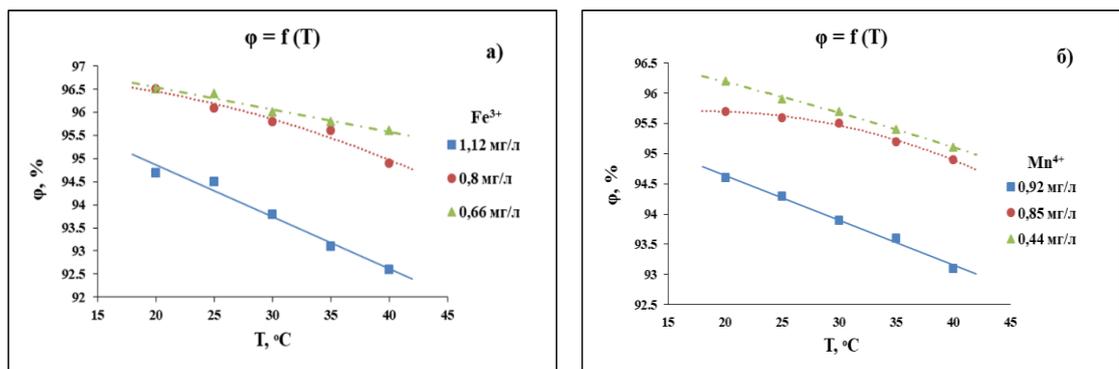


Рисунок 3.2 – Зависимость селективности исследуемых УФ мембран от температуры исходного раствора при очистке модельных растворов (а) FeCl₂ (б) MnSO₄ (P = 3 бар; pH = 7 ± 0,5)

Как видно из рисунков 3.2. (а) и (б) в исследуемом диапазоне температур очистка растворов, содержащих ионы железа (1,12 мг/л, 0,8 мг/л и 0,66 мг/л) и марганца (0,92 мг/л, 0,85 мг/л и 0,44 мг/л), продемонстрировала закономерное снижение селективности при повышении температуры. Так при температуре 20° С величина селективности была самой высокой для всех концентрациях, далее она постоянно снижалась до 40°С. Снижение селективности обусловлено разрушением ионно-гидратных слоев. При повышении температуры ослабление гидратационных оболочек снижает эффективный размер ионов железа и марганца, увеличивая их проницаемость через мембрану.

Следующим этапом работы стало изучение зависимости основных характеристик ультрафильтрационной мембраны от факторов, влияющих процессы разделения для двухкомпонентных систем, содержащих соединения железа и марганца. Исследуя ионы железа и марганца вместе в исходном растворе, можно оценить, как их совместное присутствие влияет на величину селективности разделения ультрафильтрационной мембраны и её удельную производительность в различных условиях эксплуатации.

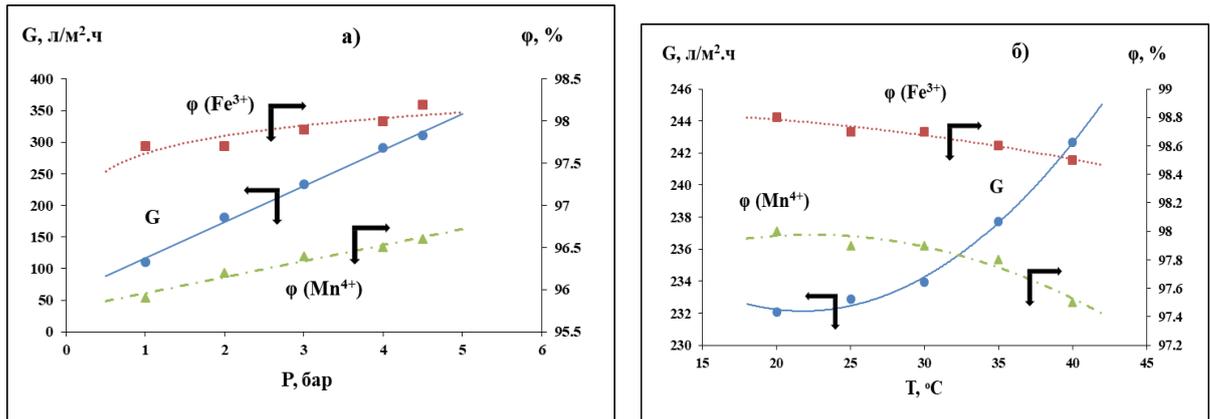


Рисунок 3.3 – Влияние рабочего давления (а) и температуры (б) на селективность и удельную производительность УФ мембраны при очистке двухкомпонентных (железа и марганец) модельных растворов

$$T = 20^{\circ}\text{C} \pm 1 \text{ (а); } P = 3 \text{ бар (б); pH} = 7 \pm 0,5$$

Модельный раствор для проведения экспериментов использовался со следующими концентрациями: 0,66 мг/л Fe^{3+} и 0,44 мг/л Mn^{4+} . Как можно отметить из рисунка 3.3 (а), в двухкомпонентной системе с ионами железа и марганца результаты показали постоянное повышение селективности разделения по обоим ионам при повышении давления с 1 до 5 бар. Эта зависимость согласуется с результатами экспериментов с однокомпонентными системами, где селективность также возрастала с увеличением давления. Однако двухкомпонентная система демонстрировала значительно более высокие значения селективности при эквивалентных давлениях по сравнению с однокомпонентными системами. При очистке двухкомпонентного раствора (с концентрациями: 0,66 мг/л Fe^{3+} и 0,44 мг/л Mn^{4+}) значения селективности по иону железа при давлении 5 бар достигли приблизительно 98,2 %, в то время как селективность по ионам марганца составила около 96,6 %. Однако в однокомпонентных растворах самые высокие значения селективности по ионам железа

и марганца при аналогичных концентрациях и давлениях, были заметно ниже. Селективность по иону железа достигла примерно 96,6 % в однокомпонентном растворе (0,66 мг/л Fe^{3+}) при давлении 5 бар, а селективность по иону марганца достигла максимума около 96,4 % в однокомпонентном растворе (0,44 мг/л Mn^{4+}) при том же давлении.

Таким образом, включение соединений железа и марганца как двухкомпонентная система в растворе привело к появлению уникальных взаимодействий, которые не наблюдались в однокомпонентных экспериментах. При наличии обоих ионов селективность повышалась при более высоких давлениях для всех концентраций, причем более выраженный эффект наблюдался в растворе с концентрациями: 0,66 мг/л Fe^{3+} и 0,44 мг/л Mn^{4+} (рисунок 3.3 а). Такое повышение селективности, вероятно, связано с конкуренцией ионов и электростатическими взаимодействиями. Когда присутствуют ионы двух типов, взаимодействие ионной конкуренции и электростатических взаимодействий на поверхности мембраны создает более плотный и селективный слой, который ограничивает проникновение ионов и повышает эффективность разделения.

В двухкомпонентных (железо и марганец) растворах снижение селективности при повышенных температурах выражено значительно, чем в однокомпонентных системах. В таких системах это связано с разрушением гидратационного слоя и повышенной подвижностью ионов, тогда как в смешанных растворах дополнительно проявляется конкуренция ионов. При высоких температурах ослабляется электростатическое отталкивание между ионами, что снижает стабильность пограничного слоя мембраны и увеличивает их проникновение.

Основная проблема очистки подземных вод заключается в том, что реальная вода содержит, как правило, не один, а еще несколько компонентов (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ и т.д.). Исходные значения общего солесодержания модельных многокомпонентных растворов до предподготовки воды составляют 7,6 г/л, 9 г/л и 5,5 г/л, соответственно. В данном эксперименте исследования проводили на фильтрах, полученных после предварительной подготовки. В таблице 3.2 представлены значения удельной производительности и селективности УФ мембран в зависимости рабочего давления при очистке многокомпонентного раствора.

Таблица 3.2 – Значения удельной производительности и селективности УФ мембраны

Давление процесса Р, бар	Удельная производительность G, л/м ² .ч	Селективность, φ (%)				
		Fe ³⁺	Mn ⁴⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Na ⁺
1	75	98.3	99.1	80.5	73.2	26.9
2	115	98.4	99.2	81.4	77.4	28.7
3	148	98.5	99.3	82.2	78.2	28.9
4	170	98.7	99.5	82.7	82.4	30.4
5	194	98.9	99.7	83.3	87.3	32.7

Селективность по ионам железа и марганца была высокой при всех давлениях, достигая максимальных значений около 98,9 % для железа и 99,7 % для марганца при давлении 5 бар для раствора с первоисходное солесодержанием 7,6 г/л. Это свидетельствует о высокой эффективности УФ-мембран в удалении этих загрязнителей, что важно для защиты ОО-мембран от избыточного загрязнения и возможных повреждений.

Концентрации ионов металлов после процесса УФ приведены в таблице 3.3. Полученные данные свидетельствуют о необходимости дополнительной обработки для эффективного удаления ионов Ca²⁺, Mg²⁺ и Na⁺, что подчеркивает важность интеграции процессов обратного осмоса после ультрафильтрации.

Таблица 3.3 – Значения концентрации ионов в пермеате после ультрафильтрации

Р, бар	G, л/м ² .ч	Концентрации ионов в пермеате, мг/л				
		Fe ³⁺	Mn ⁴⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Na ⁺
1	75	0.02	0.008	87	61	1535
2	115	0.017	0.007	81	51	1478
3	148	0.01	0.006	77	49.	1473
4	170	0.014	0.004	75	39,8	1443
5	194	0.012	0.002	72	28,8	1395

Как видно из рисунка 3.4, со временем производительность мембран снижается из-за образования осадочных слоев на поверхности мембран. После каждых 30 минут фильтрации выполнялась обратная промывка. Оптимальный интервал химической очистки — 20 фильтрциклов при снижении производительности более чем на 20% от первоначального значения. Этот режим позволяет восстановить фильтрующую способность.

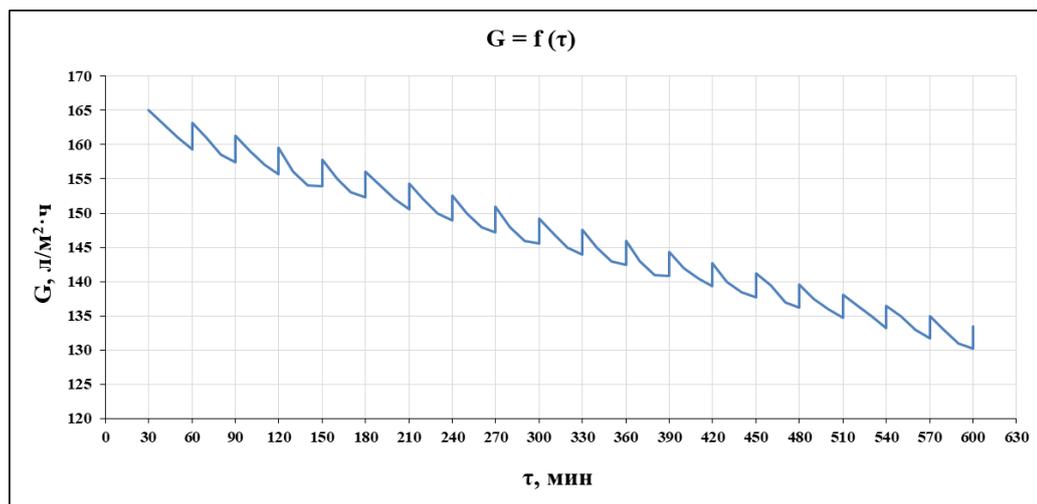


Рисунок 3.4 – Зависимость удельной производительности ультрафильтрационной мембраны от времени фильтрации при очистке модельного раствора

TDS – 7,6 г/л; P = 3 бар; T = 20°C ± 1; pH = 6,8 ± 0,5;

Обратный осмос (ОО) является важным этапом в достижении хорошего качества питьевой воды, поскольку он эффективно удаляет одновалентные соли, ионы жесткости и другие растворенные твердые вещества, которые процесс УФ не может полностью удалить. Учитывая ограничения процесса УФ в обработке ионов жесткости (Ca^{2+} , Mg^{2+}) и солей (Na^{+}), процесс ОО служит заключительной стадией очистки для получения воды питьевого качества. Система очистки воды, содержащая процесс ОО позволяет использовать двухбарьерный подход, при котором на стадии УФ удаляет определенные загрязнения, а ОО удаляет остаточные соли и ионы, обеспечивая комплексную очистку воды.

В экспериментах с различными типами солей, в частности, с солями кальция и магния (CaCl_2 , CaSO_4 , MgCl_2 , MgSO_4), было определено влияние типа аниона на характеристики мембраны обратного осмоса. Как видно из рисунка 3.5 удельная производительность уменьшается с увеличением концентрации соли во всех растворах, что согласуется с эффектом (влиянием) осмотического давления и уменьшением доли свободной воды у поверхности мембраны. Более высокие концентрации соли создают противоположную осмотическую силу, снижая суммарный поток и требуя увеличения рабочего давления для поддержания скорости через мембрану – удельной производительности процесса.

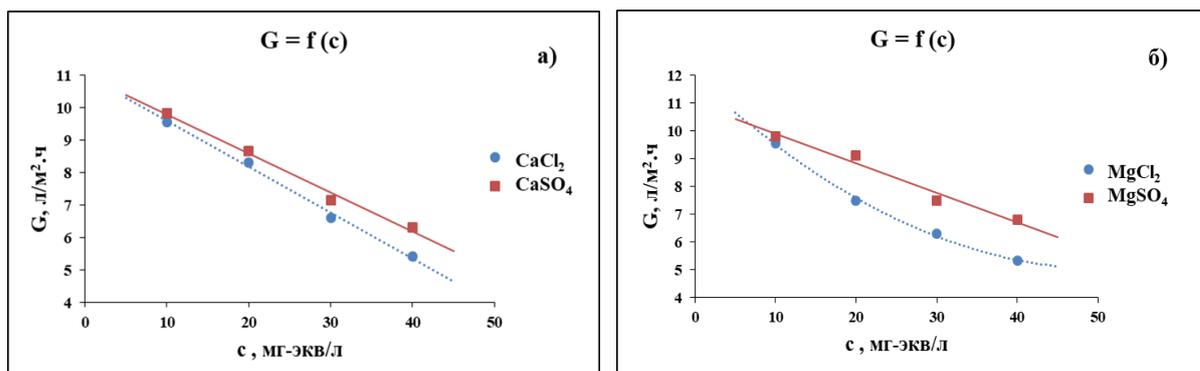


Рисунок 3.5 – Зависимость удельной производительности ОО мембраны от природы аниона и концентрации соли: а) по кальцию, б) по магнию; рН = 7 ± 1

Анализ графиков (рисунок 3.5) показывает, что сульфатные соли (CaSO₄ и MgSO₄) имеют несколько более низкую удельную производительность по сравнению с хлоридными солями (CaCl₂ и MgCl₂) при одинаковых концентрациях. Это связано с большим размером гидратированных ионов сульфата, что увеличивает сопротивление мембраны и снижает проницаемость через мембрану обратного осмоса. Для вод с преобладанием сульфатов может потребоваться более высокое давление, особенно в регионах с богатыми сульфатными водами.

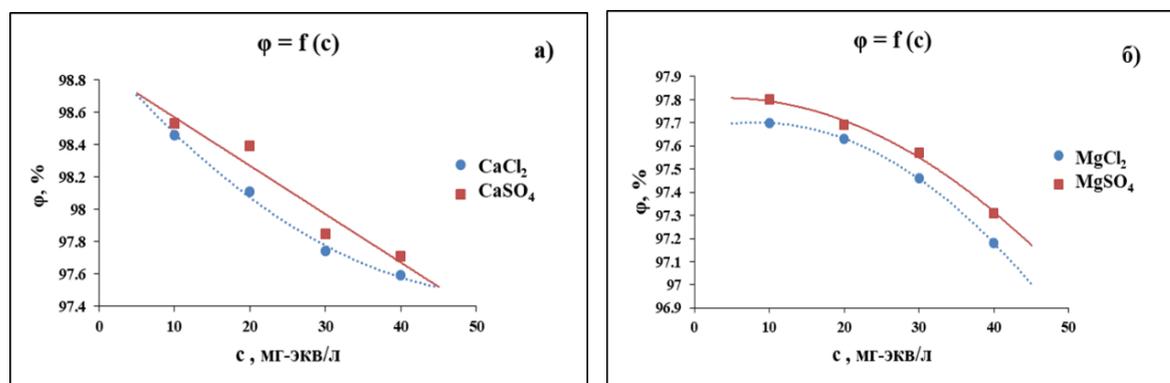


Рисунок 3.6 – Зависимость селективности ОО мембраны от природы аниона и концентрации соли: а) по кальцию, б) по магнию; рН = 7 ± 1

Экспериментальные данные (рисунок 3.6) показывают, что с увеличением концентрации соли, особенно хлоридных солей, наблюдается незначительное снижение селективности разделения. Это связано с концентрационной поляризацией, когда высококонцентрированный пограничный слой у мембраны снижает эффективную движущую силу для разделения. Кроме того, при удалении магния и кальция селективность по магнию ниже, что объясняется его меньшим ионным радиусом, позволяющим ему легче проникать через мембрану. Это подчеркивает важность как природы катиона, так и аниона для эффективности ОО.

Эксперименты по влиянию рабочего давления и температуры на удельную производительность и селективность ОО мембраны проведены аналогично предыдущим экспериментам по УФ, в ходе которых основное внимание уделялось оценке эффективности ОО мембраны с использованием многокомпонентных модельных растворов. На этом этапе концентрации модельных растворов были рассчитаны исходя из качества пермеата, полученных после УФ. Процесс УФ показал высокую селективность по ионам железа и марганца, эффективно снижая их концентрацию в пермеате. Таким образом, основной целью экспериментов по ОО было удаление оставшихся ионов, таких как Ca^{2+} , Mg^{2+} и Na^+ , при том, что концентрации железа и марганца в модельном растворе не учитывались.

Таблица. 3.4 – Химический состав модельных растворов перед обратным осмосом

Ионы	Концентрация, мг/л		
	1-й состав	2-й состав	3-й состав
Ca^{2+}	61.13	270.62	183.27
Mg^{2+}	86,69	69,21	8,69
Na^+	1535	1799.45	991.53
SO_4^-	241.1	1069.7	724
Cl^-	2521.9	2896.4	1545.4

Исследование состояло в очистке трех модельных многокомпонентных растворов с ионами Ca, Mg и Na (концентрации указаны в таблице 3.3). Эксперименты были направлены на оценку селективности мембраны ОО по этим ионам, что позволило оценить её работу в различных условиях эксплуатации.

Как видно из рисунка 3.7 (а), в исследованном диапазоне давлений, с повышением рабочего давления удельная производительность увеличивается, что согласуется с фундаментальным принципом, согласно которому более высокое давление служит движущей силой для проникновения воды через мембрану.

Как видно из рисунка 3.7 (б), селективность увеличивается с повышением рабочего давления. Это можно объяснить тем, что с увеличением давления происходит уплотнение мембраны, растёт движущая сила процесса и, как следствие, селективность разделения увеличивается. Такое уплотнение ограничивает размеры пор и снижает вероятность прохождения ионов через мембрану.

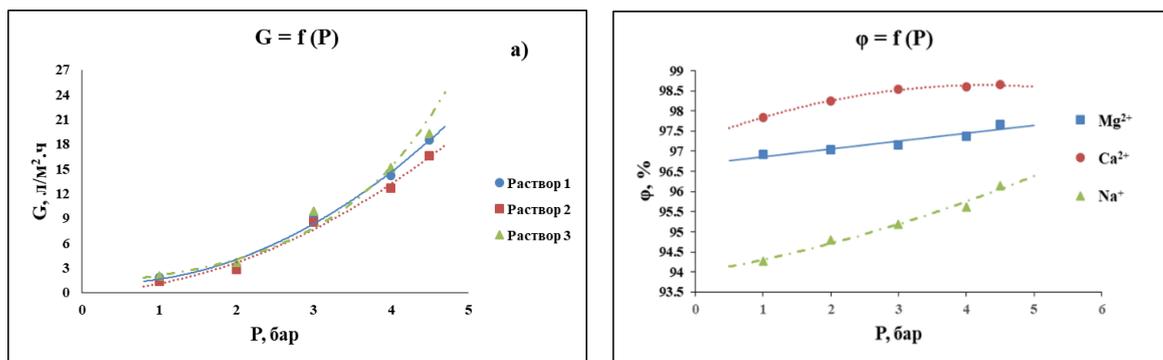


Рисунок 3.7 – Зависимость удельной производительности (а) и селективности (б) ОО мембраны от рабочего давления при очистке модельных многокомпонентных растворов ($T = 20^{\circ}\text{C} \pm 1$; $\text{pH} = 6,8 \pm 0,5$)

Кроме того, деформация, вызванная давлением, может способствовать образованию плотного активного слоя, который может препятствовать прохождению более крупных или многовалентных ионов, таких как Ca^{2+} и Mg^{2+} , более эффективно, чем более мелкие одновалентные ионы, такие как Na^{+} . Данные по селективности показывает, что селективности по иону Ca^{2+} составляет от 97,8 до 98,7 %, селективности по иону Mg^{2+} от 96,9 % до 97,6 %, а селективности по иону Na^{+} от 94,2 % до 96,1 %.

Результаты влияния температуры исходного раствора на удельную производительность ОО мембраны показали, что в диапазоне температур от 20°C до 40°C удельная производительность увеличилась с 8,9 л/м²·ч до 10,3 л/м²·ч (рисунок 3.8. а). Это объясняется снижением вязкости воды при более высоких температурах, что способствует увеличению удельной производительности пермеата.

На рисунке 3.8 (б), иллюстрирующем селективность ионов Ca^{2+} , Mg^{2+} и Na^{+} при различных температурах, показаны некоторые интересные закономерности. Селективность по иону Ca^{2+} незначительно снизилась с 98,8 % при 20°C до 98,5 % при 40°C . Аналогичным образом, селективность по иону Mg^{2+} снизилась с 97,4 % при 20°C до 97 % при 40°C . Наблюдаемое снижение селективности с повышением температуры, вероятно, связано с тем, что толщина слоя "связанной" воды уменьшается с повышением температуры раствора, нарушая "упорядоченность" молекул H_2O в структуре слоя. Увеличение конвективного потока через мембрану также приводит к снижению селективности мембраны. Проницаемость катионов через мембрану повышается вместе с коэффициентом диффузии.

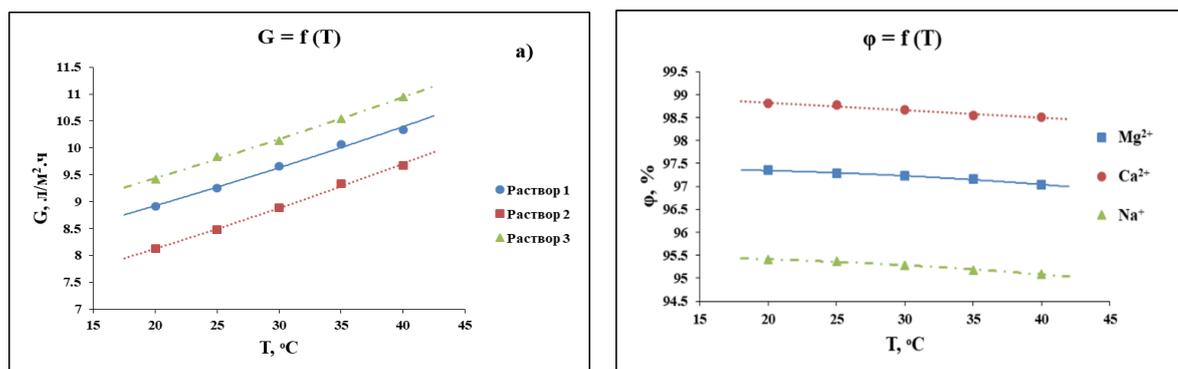


Рисунок 3.8 – Зависимость удельной производительности (а) и селективности (б) ОО мембраны от температуры исходного раствора при очистке модельных многокомпонентных растворов ($P = 3$ бар; $pH = 6,8 \pm 0,5$)

Селективность по ионам Na^+ демонстрирует результаты, начиная с 95,4 % при 20°C, достигая максимума в 97,2 % при 30°C, а затем снижаясь до 95,1 % при 40°C. Первоначальное повышение селективности по ионам Na^+ до 30°C может быть объяснено улучшенным взаимодействием ионов Na^+ с мембраной, возможно, из-за изменений в структуре гидратных оболочек или оптимальных условий для исключения размеров. Однако при температурах выше 30°C повышенная тепловая энергия нарушает стабильность этих гидратационных оболочек, что приводит к снижению селективности. Более высокие уровни энергии также повышают кинетическую активность ионов Na^+ , позволяя им легче проникать через поры мембраны.

В четвертой главе технико-экономические расчеты процесса получения воды питьевого качества выполнены на примере очистки подземных вод Республики Союз Мьянма для населенного пункта с численностью 2000 человек.

Исходные данные для проектирования: расход воды для бытовых нужд – 20,86 м³/час, требуемая производительность очищенной воды установки УФ – 23,5 м³/час, расход воды для питьевых нужд – 0,42 м³/час, требуемая производительность очищенной воды установки ОО – 0,48 м³/час, доля отбора пермеата ОО – 80%.

Принципиальная схема очистки соленоватых подземных вод с высоким содержанием соединений железа и марганца представлена на рисунке 4.1.

Таблица 4.1 – Капитальные затраты на очистку подземных вод

Наименование расходов	Стоимость (руб.)
Гидравлическая система	1500000
Дисковый фильтр	300000
Модуль УФ мембран	424000 (4 шт.)
Модуль ОО мембран	75000 (1 шт.)
Система автоматического управления	500000
Общая сумма	2799000 руб/3 год (по гарантии срока)
	933000 руб/год

Таблица 4.2 – Эксплуатационные затраты на очистку подземных вод

Наименование расходов	Стоимость (руб./год)
Реактивы	4327655
Энегро-затраты на систему УФ	42000 (5 руб/кВт•ч)
Энегро-затраты на систему ОО	69300 (5 руб/кВт•ч)
Монтаж и техническое обслуживание	50000
Общая сумма	4446955

Себестоимость очищенной воды методом УФ для бытовых нужд составляет 24 руб/м³ (600 ММК/м³), а себестоимость очищенной воды для питьевых нужд методом ОО составляет 26 руб/м³ (650 ММК/м³). (ММК - Мьянманский кьят)

Таким образом, данные технико-экономические расчеты показали перспективность и экономическую эффективность применения совмещенных схем на основе ультрафильтрация и обратного осмоса для очистки солоноватых подземных вод, обеспечивая получение качественной воды для хозяйственно-питьевых нужд.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

1. Определены характеристики эффективности ультрафильтрации в качестве предварительной стадии перед обратным осмосом при очистке растворов подземных вод – удельная производительность и селективность мембран.

2. Исследованы эксплуатационные характеристики УФ мембран для двухкомпонентных систем при разделении растворов, в которых содержатся только ионы железа и марганца. Установлено, что присутствие еще одного иона, например, железа, может усилить удаление другого иона, например, марганца. Ионы железа

взаимодействуют с ионами марганца за счет ионной конкуренции и электростатических взаимодействий, что повышает эффективность разделения.

3. Определено, что УФ мембраны обладают высокими значениями селективности – приблизительно 99,7 % для соединений железа и 98,9 % для марганца, что демонстрирует максимальный уровень очистки и эффективность удаления этих загрязнений перед стадией ОО.

4. Исследовано влияние технологических параметров на эксплуатационные характеристики обратноосмотических мембран при очистке воды, содержащей ионы жесткости (Ca^{2+} , Mg^{2+}) и одновалентные ионы (Na^+). Показано, что оптимальное удаление оставшихся ионов после стадии ультрафильтрации было достигнуто на стадии ОО, при этом достигнуты значения селективности до 98,7% для ионов Ca^{2+} , 97,7% для ионов Mg^{2+} и 96,1% для ионов Na^+ , что эффективно снижало содержание одновалентных и двухвалентных ионов.

5. Разработана технологическая схема системы очистки воды на основе баромембранных процессов.

6. Проведен технико-экономический анализ процесса очистки подземных вод на основе совмещенной системы ультрафильтрации (УФ) и обратного осмоса (ОО) для получения чистой воды питьевого качества.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ

1. Хтет Аунг. Методическое обоснование и выбор технологии очистки артезианских вод Республики Союз Мьянма / Лин Маунг Маунг, Хтет Аунг, Со Тхурейн, Д.В. Парусов, Г.Г. Каграманов, Е.Н. Фарносова // Экология и промышленность России. – 2021. – Т.25. - № 8. – С. 34–39. (**Scopus, GeoRef**)

2. Хтет Аунг. Мембранные методы очистки артезианской воды с высоким содержанием железа и марганца / Лин Маунг Маунг, Г.Г. Каграманов, Хтет Аунг // Экология и промышленность России. – 2023. – Т.27. - № 12. –С. 11-14. (**Scopus, GeoRef**)

3. Хтет Аунг. Гибридная система очистки подземных вод от соединений железа и марганца методами ультрафильтрации и обратного осмоса / Лин Маунг Маунг, Хтет Аунг, Г.Г. Каграманов // Химическая промышленность сегодня. – 2025. – № 1. – С. 63–68. (**Chemical Abstracts**)

4. Хтет Аунг. Техничко-экономический анализ для проектирования установки очистки подземной воды с высоким содержанием железа и марганца / Лин Маунг Маунг, Хтет Аунг, Г.Г. Каграманов // Химическая промышленность сегодня. – 2025. – № 1. – С. 69–72. (**Chemical Abstracts**)

5. Хтет Аунг. Очистка природной воды от соединений железа баромембранными методами / Хтет Аунг, Лин Маунг Маунг, Г.Г. Каграманов // Успехи в химии и химической технологии. – 2022. – Том XXXVI. - № 10. – С. 58-59.

6. Хтет Аунг. Очистка подземных вод от соединений железа и марганца методом ультрафильтрации / Хтет Аунг, Со Тхурейн, Лин Маунг Маунг, Г.Г. Каграманов // Успехи в химии и химической технологии. – 2023. – Том XXXVII. - № 11. – С. 14-17.

7. Хтет Аунг. Эффективность ультрафильтрации при очистке подземных вод мьянмы от соединений железа и марганца / Хтет Аунг, Лин Маунг Маунг, Со Тхурейн, Г.Г. Каграманов // Материалы XX Международной научно-практической конференции Уфа «Наука, образование, производство для противодействия техногенным угрозам и решения экологических проблем». – 2023. – С. 410-414.

8. Хтет Аунг. Умягчение воды реагентно – мембранным методом / Со Тхурейн, Хтет Аунг, Лин Маунг Маунг, А.А. Свитцов // Материалы XX Международной научно-практической конференции Уфа «Наука, образование, производство для противодействия техногенным угрозам и решения экологических проблем». – 2023. – С. 397-400.

9. Хтет Аунг. Влияние технологических параметров на эффективность разделения ультрафильтрационной мембраны при удалении железа и марганца / Хтет Аунг, Со Тхурейн, Лин Маунг Маунг, Г.Г. Каграманов // Сборник статей по материалам международной научно-практической конференции, Севастополь «Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность – 2023». – 2023. – С. 259-262.

10. Хтет Аунг. Удаление солей жесткости воды методом реагентно-мембранного умягчения / Со Тхурейн, Хтет Аунг, Лин Маунг Маунг, А.А. Свитцов // Сборник статей по материалам международной научно-практической конференции, Севастополь «Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность – 2023». – 2023. – С. 229-232.

11. Хтет Аунг. Разработка мембранной технологии очистки артезианских вод от соединений железа и марганца / Хтет Аунг, Лин Маунг Маунг, Со Тхурейн, Г.Г. Каграманов // Сборник материалов XII Международного водно-химического форума, Минск, Республика Беларусь. – 2024. – С. 179-183.

12. Htet Aung. Effectiveness of Ultrafiltration (UF) and Reverse Osmosis (RO) in the Purification of Groundwater with a High Content of Iron and Manganese / Lin Maung Maung, G. G. Kagramanov, Htet Aung // Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences. Proceedings of the 2nd International Conference on Ecology and Environmental Engineering (RusEcoCon-2024). – 2024. – P. 279-287.