

«УТВЕРЖДАЮ»

И.о. ректора РХТУ им. Д.И. Менделеева,
д.х.н., профессор Е.В. Румянцев



«16» декабря 2024 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация на тему: «Разработка мобильной мембранной установки очистки воды в условиях чрезвычайных ситуаций» по научной специальности 2.6.15. Мембраны и мембранная технология (технические науки) выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева» на кафедре мембранной технологии.

В 2017 г. Александров Роман Алексеевич окончил федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ) по специальности 14.05.03 «Технологии разделения изотопов и ядерное топливо» с присвоением квалификации «Инженер-физик».

В 2021 г. Александров Роман Алексеевич окончил очную аспирантуру НИЯУ МИФИ по специальности 01.04.14 «Теплофизика и теоретическая теплотехника» с присвоением квалификации «Исследователь. Преподаватель-исследователь».

С 01.10.2024 г. по 31.12.2024 г. Александров Роман Алексеевич зачислен для подготовки диссертации на соискание ученой степени кандидата наук без освоения программ подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре РХТУ им. Д.И. Менделеева.

Справка о сдаче кандидатских экзаменов по научной специальности 2.6.15. Мембраны и мембранная технология выдана федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева» в 2024 году.

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

По результатам рассмотрения диссертации на тему: «Разработка мобильной мембранной установки очистки воды в условиях чрезвычайных ситуаций» принято следующее заключение.

Диссертация Александрова Романа Алексеевича является законченной научно-исследовательской работой и посвящена разработке блока предварительной подготовки воды для мембранных устройств очистки, а также разработке и созданию мобильной мембранной установки очистки сильнозагрязненных поверхностных вод при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций.

В связи с тем, что рабочие характеристики мембран, применяемых для очистки воды (удельная производительность и селективность), зависят от качественного и количественного состава очищаемых вод, разработка систем предподготовки воды является актуальной задачей. Для разработки эффективной, с точки зрения степени очистки и удельных энергозатрат, мобильной установки очистки сильнозагрязненных вод в условиях чрезвычайных ситуаций необходимо применение грамотных технологических решений, современных композиционных реагентов, интенсификаторов процессов очистки, мембранных технологий.

Целью работы являлась разработка мобильной установки очистки поверхностных вод со сложным составом загрязнителей на основе сочетания реагентного и мембранного методов, с высокой эффективностью по степени очистки, реагенто- и энергозатратам.

Для достижения поставленной цели в работе решались следующие задачи:

- разработан новый способ получения и исследован гибридный алюмокремниевый реагент, обладающий одновременно свойствами коагулянта, флокулянта и сорбента.

- выполнены экспериментальные исследования процессов очистки модельных растворов, содержащих наиболее распространенные загрязнители (тяжелые металлы, нефтепродукты, взвешенные вещества), с использованием композиционных алюмокремниевых флокулянтов-коагулянтов для выявления наиболее эффективных образцов реагентов.

- разработано устройство дозирования и смешения реагентов, включающее струйные эжекционные смесители, обеспечивающие гидродинамическую интенсификацию процесса реагентной предочистки воды.

- разработана принципиальная гидравлическая схема блока предварительной подготовки и блока мембранной очистки и обоснованы выбранные технические решения.

- разработан и изготовлен экспериментальный образец мобильной установки очистки, и проведены испытания на модельных и реальных загрязненных водах.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработан новый способ получения гибридного алюмокремниевого реагента и определены оптимальные дозы реагента и значения рН при

очистке модельных водных растворов на основе результатов математического моделирования и экспериментальных исследований.

2. Впервые обнаружен эффект снижения концентрации остаточного алюминия в воде после обработки алюмосодержащим реагентом и предложена гипотеза о формировании в процессе очистки алюмокремниевых цеолитоподобных структур, обладающих сорбирующим действием.

3. Разработана новая комбинированная реагентно-мембранная система очистки воды на основе блока предварительной подготовки с устройством эжекционного дозирования и смешения реагентов и блока мембранной очистки на основе устройства микрофльтрации с использованием мембраны из пористого карбида титана и устройства обратного осмоса.

Теоретическая и практическая значимость работы состоит в следующем:

1. Показано, что использование гибридного алюмокремниевого реагента позволяет более чем на порядок (до 0,02–0,05 мг/л) снизить концентрацию токсичного остаточного алюминия в очищенной воде по сравнению с другими алюмосодержащими реагентами за счет формирования в процессе очистки алюмокремниевых цеолитоподобных структур, обладающих эффектом объемной сорбции в диапазоне рН от 6,0 до 8,0. Показана эффективность гибридного алюмокремниевого реагента по сравнению с промышленным аналогом (прототипом) при очистке модельных растворов. Степень очистки от меди на 15% выше, чем у промышленного аналога – реагента АКФК, а степень осветления воды, содержащей Fe(III) и взвешенные вещества, за одно и тоже время выше на 13,5% и 14% соответственно.

2. Разработано новое устройство дозирования и смешения реагентов на основе струйных смесителей – водоводяного и водовоздушного эжекторов, с целью интенсификации процессов очистки и повышения степени очистки воды за счёт перемешивания реагентов в интенсивных гидродинамических полях при $Re \gg Re_{кр}$ и создания эффекта гидродинамической кавитации.

3. Установлено, что использование блока предварительной подготовки воды на основе устройства эжекционного дозирования и смешения реагентов позволяет повысить удельную производительность устройства микрофльтрации до 3,7 раза при очистке воды от нефтепродуктов и солей жесткости и до 4,3 раза при очистке от тяжелых металлов (медь).

4. Разработан экспериментальный образец мобильной установки для очистки воды с блоками предварительной реагентной подготовки и мембранной очистки, который обеспечивает заданную степень очистки сильнозагрязненных сточных вод по основным загрязнителям при минимальных среди аналогов удельных энергозатратах – 2,6 кВт·ч/м³. Показано, что степень очистки сточных вод после стадии микрофльтрации по всем показателям составляет более 99%, после стадии обратного осмоса достигает 99,9% по тяжелым металлам и 99,7% по нефтепродуктам.

Основные теоретические и экспериментальные результаты получены Александровым Романом Алексеевичем самостоятельно и не вызывают

сомнения в достоверности. Достоверность полученных результатов подтверждается применением известных физических закономерностей, апробированного математического аппарата, аттестованных измерительных средств, апробированных методик измерения, а также воспроизводимостью результатов, полученных экспериментальным путем.

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 12 научных трудах, в том числе 4 статьях в изданиях, индексируемых в международных базах данных (Scopus, Web of Science, GeoRef, Chemical Abstracts Service), 5 тезисах и материалах международных и всероссийских конференций, а также 3 патентах.

Результаты диссертации представлены на международных и всероссийских конференциях, в том числе на XIII Всероссийской научной конференции (с международным участием) МЕМБРАНЫ-2016, г. Нижний-Новгород, 2016 г.; на XVI и XVII Международной научной конференции и школе молодых учёных «Физико-химические процессы в атомных системах», г. Москва, 2017 г. и 2019 г.; на 9-й Международной конференции и выставке по методам разделения, г. Цюрих, 2018 г.; на V Международной конференции и молодежной школе «Информационные технологии и нанотехнологии» (ITNT – 2019), г. Самара, 2019 г.; на XX и XXI Менделеевском съезде по общей и прикладной химии, г. Екатеринбург (XX) и г. Санкт-Петербург (XXI), 2016 г. и 2019 г. соответственно; на III Международной научно-практической конференции «Наука, общество, инновации: актуальные вопросы современных исследований», г. Пенза, 2023 г.

Публикации в изданиях, индексируемых в международных базах данных:

1. Mobile Installation of Water Treatment in the Aftermath of Emergency Situations / R. Alexandrov, D. Feklistov, N. Laguntsov, I. Kurchatov // *Ecology and Industry of Russia*. – 2019. – Vol. 23, № 1. – P. 4–10. DOI: 10.18412/1816-0395-2019-1-4-10 (Scopus).

2. Investigation of the Water Treatment Process Using a Hybrid Alumosilicic Reagent / R. A. Alexandrov, D. Y. Feklistov, V. A. Salomasov [et al.] // *Journal of Water Chemistry and Technology*. – 2018. – Vol.40, № 3. – P.136–142. DOI: 10.3103/S1063455X18030049 (WoS).

3. Alexandrov R. A. The development of ejection reagent input in water treatment systems / R. A. Alexandrov, N. I. Laguntsov, I. M. Kurchatov // *Physics Procedia*. – 2015. – Vol. 72. – P. 103–107. DOI: 10.1016/j.phpro.2015.09.028 (Scopus).

4. Александров Р. А. Разработка блока предварительной подготовки воды для гибридной реагентно-мембранной системы очистки / Р. А. Александров, Г. Г. Каграманов, Н. И. Лагунцов // *Водоснабжение и санитарная техника*. – 2023. – № 4. – С. 8–20. (GeoRef, Chemical Abstracts Service).

Патенты:

1. Пат. 163042 Российская Федерация, МПК C02F 1/24, B01F 5/04. Устройство дозирования и смешения реагентов / Александров Р. А, Курчатов И. М, Феклистов Д. Ю. – N 2015156438/05; заявл. 28.12.2015; опубл. 10.07.2016.
2. Пат. 169396 Российская Федерация, МПК C02F 1/00, C02F 9/00. Мобильная установка очистки воды / Александров Р. А, Курчатов И. М, Лагунцов Н. И, Феклистов Д. Ю. – N 2016125961; заявл. 29.06.2016; опубл. 16.03.2017.
3. Пат. 2661584 Российская Федерация, МПК C01F 7/74, C02F 1/52, 1/28, C01B 33/26. Способ получения гибридного алюмокремниевого реагента для очистки природных и промышленных сточных вод и способ очистки природных и промышленных сточных вод этим реагентом / Александров Р. А, Курчатов И. М, Лагунцов Н. И, Феклистов Д. Ю. – N 2017111285; заявл. 04.04.2017; опубл. 17.07.2018.

Публичные доклады на всероссийских и международных научных мероприятиях (конференциях, съездах, симпозиумах, конгрессах):

1. Александров Р. А. Мобильная мембранная установки очистки воды / Р. А. Александров, Г. Г. Каграманов // III Международная научно-практическая конференция «Наука, общество, инновации: актуальные вопросы современных исследований». Сборник статей. Пенза. 2023. С. 60–64.
2. Alexandrov R. A. Physico-chemical treatment of waters of complex composition / R. A. Alexandrov, D. Y. Feklistov // XVII International Scientific Conference and School of Young Scholars “Physical and Chemical Processes in Atomic Systems”. Book of abstracts. Moscow. 2019. P. 52.
3. Александров Р. А. Комплексная очистка вод сложного состава / Р. А. Александров, Д. Ю. Феклистов, А. А. Тишин // XXI Менделеевский съезд по общей и прикладной химии. Сборник материалов. Том 3. Санкт-Петербург. 2019. С. 285.
4. Александров Р. А. Математическое моделирование электролизной многоступенчатой установки для получения тяжелой и легкой воды / Р. А. Александров, Н. И. Лагунцов, С. Н. Тихонов // V Международная конференция и молодежная школа «Информационные технологии и нанотехнологии». Сборник докладов. Самара. 2019. С. 104–110.
5. Александров Р. А. Влияние эффекта квазиумягчения на образование накипи на поверхности теплообменников / Р. А. Александров, Д. Ю. Феклистов, А. А. Тишин, Е. А. Ананьева, Н. В. Липанова // XXI Менделеевский съезд по общей и прикладной химии. Сборник материалов. Том 3. Санкт-Петербург. 2019. С. 393.

Работа Александра Романа Алексеевича выполнена на хорошем теоретическом и практическом уровне и имеет перспективы коммерциализации. На разработанные способ получения гибридного

алюмокремниевого реагента, устройство дозирования и смешения реагентов, а также мобильную установку очистки воды получены патенты на изобретение и полезные модели. На оба патента на полезные модели заключен лицензионный договор на неисключительную лицензию сроком на 5 лет на территории РФ. Дата и номер государственной регистрации договора: 07.07.2017 РД0226966.

Кафедра мембранной технологии считает, что диссертационная работа Александрова Романа Алексеевича по тематике, методам исследования, предложенным новым научным положениям соответствует паспорту научной специальности 2.6.15. Мембраны и мембранная технология в п. 5 Комбинированные и гибридные процессы мембранной технологии (сочетание мембранных процессов с другими процессами химической технологии: абсорбцией, адсорбцией, ректификацией, дистилляцией), п. 6 Применение мембранных процессов в промышленности, охране окружающей среды и медицине, в том числе решение проблем водного хозяйства, разделения жидких и газовых смесей, выделения ценных или токсичных компонентов из сточных вод и газовых выбросов, использование процессов и устройств для поддержания жизнедеятельности человека и п. 7 Изучение особенностей мембранных систем, таких как концентрационная поляризация, засорение и старение мембран, и методов борьбы с этими явлениями.

Автореферат отражает основное содержание диссертации.

Диссертационная работа Александрова Романа Алексеевича удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым ВАК РФ к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук, а ее автор заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук за разработку мобильной мембранной установки очистки воды в условиях чрезвычайных ситуаций.

С учетом научной зрелости автора, актуальности, научной новизны и практической значимости работы, а также ее соответствия требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней в федеральном государственном бюджетном учреждении высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева», предъявляемым к подобным работам, диссертация на тему: «Разработка мобильной мембранной установки очистки воды в условиях чрезвычайных ситуаций» рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.15. Мембраны и мембранная технология.

Диссертация рассмотрена на заседании кафедры мембранной технологии РХТУ им. Д.И. Менделеева, состоявшемся «13» декабря 2024 года, протокол № 4. В обсуждении приняли участие: заведующий кафедрой мембранной технологии, д.т.н., проф. Каграманов Г.Г., заведующий кафедрой коллоидной химии, д.х.н., доцент Гаврилова Н.Н., профессор кафедры мембранной технологии, д.т.н., Самбурский Г.А., к.х.н., доцент Дибров Г.А., к.т.н., доцент Свитцов А.А., секретарь кафедры мембранной технологии, асс. Бланко-Педрехон А.М.

Принимало участие в голосовании 6 чел. Результаты голосования: "За" – 6 чел., "Против" – 0 чел., "Воздержались" – 0 чел., протокол № 4 от «13» декабря 2024 г.

Профессор кафедры
мембранной технологии
РХТУ им. Д.И. Менделеева
доктор технических наук



Г.А. Самбурский

Секретарь заседания,
ассистент



А.М. Бланко-Педрехон