

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА

РХТУ.2.6.08 РХТУ им. Д.И. Менделеева

по диссертации на соискание ученой степени кандидата наук

аттестационное дело № 8/26

решение диссертационного

совета от 24 апреля 2026 г. № 13

О присуждении ученой степени кандидата технических наук Крючкову Сергею Сергеевичу, представившему диссертационную работу на тему «Физико-химические основы мембранно-абсорбционного газоразделения техногенных газов» по научной специальности 2.6.15 Мембраны и мембранная технология.

Принята к защите 17 марта 2026 г., протокол № 12 диссертационным советом РХТУ.2.6.08 РХТУ им. Д.И. Менделеева.

Состав диссертационного совета утвержден в количестве 11 человек приказом и.о. ректора РХТУ им. Д.И. Менделеева № 352 А от 8 сентября 2022 г. В состав диссертационного совета внесены изменения в соответствии с приказом и.о. ректора РХТУ им. Д.И. Менделеева № 118 ОД от 13 декабря 2024 г.

Соискатель Крючков Сергей Сергеевич 1997 года рождения, гражданин Российской Федерации. В 2019 окончил федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», диплом серия 105205 номер 0823876 от 11 июля 2019 г. В 2021 году окончил федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», диплом с отличием серия 105205 номер 0212518 от 15 июля 2021 г. В 2025 году окончил аспирантуру федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева», диплом серия 107734 номер 0245726 от 02 июля 2025 г.

Соискатель работает младшим научным сотрудником в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева».

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева» (РХТУ им. Д.И. Менделеева) в лаборатории мирового уровня SMART полимерных материалов и технологий.

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор Воротынцев Илья Владимирович, профессор кафедры ЮНЕСКО «Зелёная химия для устойчивого развития» РХТУ им. Д.И. Менделеева.

Официальные оппоненты:

Доктор химических наук, профессор, Плиско Татьяна Викторовна, заведующая лабораторией мембранных процессов Государственного научного учреждения «Институт физико-органической химии Национальной академии наук Беларуси».

Кандидат химических наук, Баженов Степан Дмитриевич, заведующий лабораторией № 13 «Извлечение и утилизация диоксида углерода» Федерального

государственного бюджетного учреждения науки Ордена Трудового Красного Знамени Института нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева Российской академии наук (ИНХС РАН).

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

Основные положения и выводы диссертационного исследования в полной мере изложены в 9 научных работах, опубликованных соискателем, в том числе 2 статьях в изданиях, индексируемых в международных базах данных (Scopus, Web of Science), 6 тезисах и материалах международных и всероссийских конференций, а также 1 патенте.

Наиболее значимые работы:

1. Petukhov, A.N. An Efficient Technique for Ammonia Capture in the Haber–Bosch Process Loop – Membrane-Assisted Gas Absorption / A.N. Petukhov, A.A. Atlaskin, K.A. Smorodin, S.S. Kryuchkov, D.M. Zarubin, M.E. Atlaskina, A.N. Petukhova, A.N. Stepakova, A.A. Golovacheva, A.N. Markov, E.A. Stepanova, A.V. Vorotyntsev, I.V. Vorotyntsev // *Polymers*. – 2022. V. 14. 2214. (Scopus, Web of Science)

2. Petukhov, A.N. A highly-efficient hybrid technique – Membrane-assisted gas absorption for ammonia recovery after the Haber-Bosch process / A.N. Petukhov, A.A. Atlaskin, S.S. Kryuchkov, K.A. Smorodin, D.M. Zqrubin, A.N. Petukhova, M.E. Atlaskina, A.V. Nyuchev, A.V. Vorotyntsev, M.M. Trubyanov, I.V. Vorotyntsev, V.M. Vorotyntsev // *Chemical Engineering Journal*. – 2021. V. 421, Part 2. 127726. (Scopus, Web of Science)

Все работы опубликованы в соавторстве. Личный вклад автора составляет от 50 до 90 % и заключается в непосредственном формулировании цели и задачи работы, выборе методов исследования, проведения анализа и обработке полученных результатов. Автор принимал непосредственное участие в проектировании и монтаже экспериментальной установки, проведении экспериментальной работы, статистической обработке полученных результатов и их интерпретации, формулировании выводов и положений и подготовке публикаций.

Результаты диссертации представлены на 6 международных и всероссийских конференциях:

1. Крючков С.С. Развитие метода мембранно-абсорбционного газоразделения на примере задач выделения аммиака / С.С. Крючков, А.А. Атласкин, К.А. Смородин [и др.] // *Мембраны-2022: Тезисы докладов XV юбилейной Всероссийской научной конференции с международным участием*, Тульская область, 26 – 30 сентября 2022 года. – Москва: Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, 2022. – С. 311-313.

2. Атласкин А.А. Мембранно-абсорбционное газоразделение – эффективный способ улавливания кислых и щелочных газов / А.А. Атласкин, А.Н. Петухов, К.А. Смородин, С.С. Крючков, А.Н. Степакова, И.В. Воротынцев // *Мембраны-2022: Тезисы докладов XV юбилейной Всероссийской научной конференции с международным участием*, Тульская область, 26 – 30 сентября 2022 года. – Москва: Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, 2022. – С. 158-160.

3. Крючков С.С. Исследование мембранно-абсорбционной технологии с использованием полуволоконной конфигурации модуля / С.С. Крючков, А.А. Атласкин, К.А. Смородин, А.Н. Степакова, А.Н. Петухов // *Технологическая платформа «Глубокая переработка углеводородных ресурсов»*. Материалы XIV научно-практической

конференции «Актуальные задачи нефтегазохимического комплекса» / Под редакцией А.В. Назарова и Б.П. Туманяна – М.: Издательский центр РГУ нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина, 2021. – 174 с. ISBN 978-5-9903891-6-8. – С. 93-95.

4. Kryuchkov S.S. Intensification of ammonia capture by membrane assisted gas absorption technique using deep eutectic solvents as an absorbent / S.S. Kryuchkov, A.A. Atlaskin, K.A. Smorodin, A.N. Petukhova, M.M. Trubyanov, A.N. Petukhov // International conference “Materials science of the future: research, development, scientific training (MSF’2020)” (17 – 18 November, 2020, Nizhny Novgorod, Lobachevsky University): Abstracts. – Nizhny Novgorod: Nizhny Novgorod University Press, 2020. – 119 pp. – ISBN 978-5-91326-622-4. – P. 36.

5. Атласкин А.А. Комплексная экспериментальная оценка эффективности метода мембранно-абсорбционного газоразделения в задачах выделения аммиака после процесса Габера / Атласкин А.А., Крючков С.С., Атласкина М.Е., Смородин К.А., Зарубин Д.М., Петухов А.Н., Воротынцев И.В. // Структура и динамика молекулярных систем: сборник тезисов докладов и сообщений XXVI Всероссийской конференции и 17-й Школы молодых ученых, Национальный парк «Марий Чодра», 17 – 21 августа 2020 года. – Национальный парк «Марий Чодра»: Издательство «Перо», 2020. – 255 с. – ISBN 978-5-00171-275-6. –С. 19-20.

6. Kryuchkov S. S. Experimental Evaluation of the Membrane-Assisted Gas Absorption Technique Efficiency Using an Aqueous Solution of PEG-400 for the Ammonia Capture / S. S. Kryuchkov, A. N. Petukhov, A. A. Atlaskin // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: 2020 International Science and Technology Conference on Earth Science, ISTCEarthScience 2020, Vladivostok, 06–09 October 2020. – IOP Publishing Ltd: IOP Publishing Ltd, 2021. – P. 052071. – DOI 10.1088/1755-1315/666/5/052071.

По итогам диссертационной работы был получен 1 патент на изобретение:

1. Патент № 2810484 С1 Российская Федерация, МПК C01C 1/12, B01D 53/14, B01D 53/22. Способ выделения аммиака из циркуляционного газа синтеза аммиака и устройство для его осуществления : N 2023111450 : 03.05.2023 : опубл. 27.12.2023 / А.Н. Петухов, С.С. Крючков, А.А. Атласкин [и др.]; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева».

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

1. Отзыв официального оппонента – Доктор химических наук, профессор, Плиско Татьяна Викторовна, заведующая лабораторией мембранных процессов Государственного научного учреждения «Институт физико-органической химии Национальной академии наук Беларуси». В отзыве отражена актуальность работы, научная новизна, практическая значимость, достоверность результатов и выводов. Отзыв положительный. Имеются следующие замечания и вопросы по диссертации:

1. На с.76 диссертационной работы указано, что «была определена зависимость между эффективностью выделения аммиака и производительностью процесса, был выявлен диапазон с наиболее выгодным соотношением эффективность/производительность». Однако, не ясно, какая была производительность процесса и каково значение выявленного диапазона с наиболее выгодным соотношением эффективность/производительность, так как на рис. 3.1 - 3.10 приведены данные лишь об

эффективности разделения для различных комбинаций мембраны и абсорбента для смесей аммиак/азот, аммиак/водород.

2. Не указаны геометрические размеры (диаметр, толщина стенки) и транспортные характеристики полволоконных ультрафильтрационной и газоразделительной мембран, используемых в полволоконном мембранно-абсорбционном модуле. В связи с этим возникает вопрос, какова была толщина абсорбционного слоя в полволоконном мембранно-абсорбционном модуле.

3. При обсуждении результатов в главе 3 (с.68 и далее) не указано, какая использовалась толщина абсорбционного слоя. Не ясно, как контролировалась толщина абсорбционного слоя в плоскокамерном мембранно-абсорбционном модуле.

4. Для обсуждения зависимости времени выхода на стационарный режим от расхода питающего потока (с.100) целесообразно было бы представить соответствующую графическую зависимость.

5. Необходимы пояснения к графикам зависимостей 5,4 и 5,6 на с.96 и с.98. В подписи к графикам обозначено, что это «концентрация  $H_2$ ,  $N_2$ ,  $Ar$  и  $CH_4$  (об.%) в потоках пермеата и ретентата в случае продувки ячейки смесью  $H_2/N_2$  ( $He$ ) в зависимости от величины питающего потока ( $см^3/мин$ ) в процессе улавливания аммиака (стационарное состояние)», однако, две оси ординат имеют иные обозначения.

6. Из текста диссертации не следует, какие преимущества предоставляет конфигурация мембранно-абсорбционного модуля «волокно в волокне» по сравнению с плоскокамерным мембранно-абсорбционным модулем. Есть ли преимущество по производительности процесса?

7. Какие требования предъявляются к полволоконной ультрафильтрационной мембране в полволоконном мембранно-абсорбционном модуле? Возможно, было бы целесообразно исследовать полволоконные мембраны с различным внутренним диаметром для установления оптимальной толщины абсорбционного слоя.

Заключение по работе положительное. Высказанные замечания и вопросы носят дискуссионный и уточняющий характер, не затрагивают принципиальных положений диссертационной работы и не снижают общей положительной оценки выполненного исследования.

Общее заключение и оценка представленной диссертационной работы:

Следует подчеркнуть, что диссертационная работа Крючкова С.С. является завершенной научно-квалификационной работой, в которой решена актуальная научно-техническая задача, имеющая значение для развития мембранной технологии и гибридных процессов газоразделения. Представленный материал свидетельствует о том, что автор владеет современными экспериментальными методами и корректно интерпретирует полученные результаты с позиций физико-химических закономерностей массопереноса.

Полученные в диссертации результаты обладают научной новизной и практической значимостью, а разработанное аппаратное решение (полволоконный модуль типа «волокно в волокне») подтверждено патентом Российской Федерации, что дополнительно характеризует работу как ориентированную на практическую реализацию. Представленные экспериментальные данные, включая демонстрацию снижения концентрации аммиака в рецикле с 4,5 до 1,5 об.% и получение пермеата с содержанием до

97,5 об.%  $\text{NH}_3$ , являются существенными и подтверждают эффективность предложенного подхода.

Диссертационная работа полностью соответствует паспорту специальности 2.6.15 Мембраны и мембранная технология (п. 3. Разработка принципов функционирования мембран различного назначения (обратноосмотических, нано-, ультра-, микрофльтрационных, первапорационных, ионообменных, газоразделительных) при мембранном разделении компонентов жидких и газовых смесей, в том числе в мембранных контакторах и мембранном катализе; п. 4. Технологические схемы с применением мембранных процессов, их экономическое и экологическое обоснование; п. 5. Мембранные процессы очистки, извлечения (кондиционирования) жидких и газообразных энергоносителей из смесей их содержащих природного, биогенного и техногенного происхождения. Комбинированные и гибридные процессы мембранной технологии (сочетание мембранных процессов с другими процессами химической технологии: абсорбцией, адсорбцией, ректификацией, дистилляцией). Также работа удовлетворяет требованиям к кандидатским диссертациям, определенным Положением о порядке присуждения ученых степеней в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева», утвержденным приказом и.о. ректора РХТУ им. Д.И. Менделеева от 14.09.2023 г. № 103ОД, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.15. Мембраны и мембранная технология.

2. Отзыв официального оппонента – кандидата химических наук, Баженова Степана Дмитриевича, заведующего лабораторией № 13 «Извлечение и утилизация диоксида углерода» Федерального государственного бюджетного учреждения науки Ордена Трудового Красного Знамени Института нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева Российской академии наук (ИНХС РАН). В отзыве отражена актуальность работы, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, достоверность результатов и выводов. Отзыв положительный. Имеются следующие замечания и вопросы по диссертации:

1. В работе недостаточно подробно проанализировано влияние изменения давления на эффективность мембранно-абсорбционного процесса, хотя данный параметр существенно влияет на растворимость аммиака, величину движущей силы, а также на контакт абсорбента с материалом мембраны.

2. При описании принципа мембранно-абсорбционного газоразделения возникает закономерное замечание – прямой контакт жидкого абсорбента и мембраны (особенно при приложении давления) может приводить к набуханию и изменению структуры полимерной матрицы мембраны, что в пределе может приводить к прямому гидродинамическому потоку абсорбента через мембрану. Например, в литературе по мембранно-абсорбционному улавливанию  $\text{CO}_2$  показано, что пленки из дизамещенных полиацетиленов (перспективные материалы для создания тонких барьерных слоев для предотвращения протекания абсорбентов) – сильно набухают в ряде абсорбентов на основе ионных жидкостей. Вследствие этого может сложиться такая ситуация, что в формулу 2.1 главы 2 необходимо будет ввести третий компонент в сопротивление массопереносу, а именно сопротивление слоя набухшего полимера мембраны, приведенной в контакт с абсорбентом. Из текста диссертации не ясно, исследовал ли автор

длительное взаимодействие использованных материалов (ПВТМС, лестолил, полисульфон) с исследованными абсорбционными жидкостями для определения их набухания, и исследовалось ли возможное изменение пористой структуры мембран в этом случае?

3. Четвертая глава диссертации посвящена разработке и созданию модуля мембранно-абсорбционного газоразделения с половолоконной конфигурацией ячейки. В целом половолоконные мембраны обеспечивают более высокую удельную площадь поверхности массопереноса, вследствие чего более перспективны с точки зрения промышленной реализации. В этом плане в тексте диссертации в разделе «экспериментальная часть» было бы уместным привести таблицу с характеристиками использованных половолоконных мембран (диаметры – внешний и внутренний, пористость и средний размер пор ультрафильтрационной мембраны, толщина селективного слоя газоразделительной мембраны, и др.), а в четвертой главе было бы логичным указать, какая толщина слоя абсорбента между коаксиально расположенными волокнами была реализована экспериментально.

4. Было бы целесообразно представить более развернутый анализ влияния температуры на кинетику процесса и устойчивость характеристик абсорбента.

5. В тексте не приведена количественная оценка возможного снижения удельных энергозатрат по сравнению с традиционным конденсационным методом, что позволило бы более полно оценить технологические преимущества разработанного подхода. Навыки Автора по работе в моделирующей среде AspenPlus (например, рисунок 2.12) могли бы наглядно продемонстрировать эффективность разработанной системы в общей химико-технологической схеме.

6. Представляется полезным дополнительно обсудить перспективы промышленного масштабирования с точки зрения обеспечения равномерности распределения абсорбента в межволоконном пространстве.

7. В подписях к каждому рисунку для большей наглядности следовало бы указывать толщину слоя жидкого абсорбента, который был реализован в каждом эксперименте.

8. В целом по тексту работы можно отметить ряд ошибок, опечаток, и некорректных терминов (дисубституированные полиацетилены).

Заключение по работе положительное. Отмеченные замечания и вопросы не носят принципиального характера, не снижают научной и практической значимости полученных результатов и в основном относятся к возможному расширению обсуждения прикладных аспектов и режимной интерпретации экспериментальных данных.

Общее заключение и оценка представленной диссертационной работы:

В целом диссертационная работа отличается хорошим уровнем экспериментальной проработки, корректным выбором объектов исследования и последовательной логикой перехода от плоскокамерных исследований к половолоконному аппаратурному решению, подтвержденному испытаниями на многокомпонентной модельной газовой смеси.

Заявленные положения, выносимые на защиту, в целом подтверждены данными диссертации, а сформулированные в заключении выводы отражают достижение цели и решение поставленных задач. Диссертационная работа выполнена на актуальную тему, содержит научную новизну, имеет практическую значимость, результаты отличаются достоверностью и воспроизводимостью.

Диссертационная работа Крючкова Сергея Сергеевича на тему «Физико-химические основы мембранно-абсорбционного газоразделения техногенных газов» полностью соответствует паспорту специальности 2.6.15. Мембраны и мембранная технология (п. 3. Разработка принципов функционирования мембран различного назначения (обратноосмотических, нано-, ультра-, микрофльтрационных, первапорационных, ионообменных, газоразделительных) при мембранном разделении компонентов жидких и газовых смесей, в том числе в мембранных контакторах и мембранном катализе; п. 4. Технологические схемы с применением мембранных процессов, их экономическое и экологическое обоснование; п. 5. Мембранные процессы очистки, извлечения (кондиционирования) жидких и газообразных энергоносителей из смесей их содержащих природного, биогенного и техногенного происхождения. Комбинированные и гибридные процессы мембранной технологии (сочетание мембранных процессов с другими процессами химической технологии: абсорбцией, адсорбцией, ректификацией, дистилляцией).

Диссертация Крючкова С.С. является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной задачи применения мембранно-абсорбционного газоразделения для разделения аммиак-содержащих технологических смесей процесса Габера-Боша.

Выполненная Сергеем Сергеевичем Крючковым диссертационная работа удовлетворяет требованиям к кандидатским диссертациям, определенным Положением о порядке присуждения ученых степеней в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева», утвержденным приказом и.о. ректора РХТУ им. Д.И. Менделеева от 14.09.2023 г. № 103ОД, а ее автор, Крючков Сергей Сергеевич, заслуживает присуждения искомой ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.15. Мембраны и мембранная технология.

3. Отзыв ведущей организации – федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет» (ФГБОУ ВО «КНИТУ»). Отзыв составлен и подписан доцентом кафедры «Процессы и аппараты химической технологии», к.т.н. Фазлыевым Азатом Равилевичем, утвержден проректором по научной работе и инновациям ФГБОУ ВО «КНИТУ» Гильмутдиновым Ифаром Маликовичем. В отзыве отражены актуальность исследования, анализ содержания диссертационной работы, теоретическая значимость, практическая значимость, достоверность и обоснованность результатов. Отзыв положительный.

Замечания и вопросы по диссертационной работе:

1. В тексте диссертации присутствуют неточности и ошибочные интерпретации, например:

- «Коэффициенты массопереноса зависят от площади контакта, режима течения и...» Коэффициенты массопереноса от площади контакта не зависят по их определению!

- «более толстый слой жидкости ... увеличивает путь диффузии молекул газа от поверхности к мембране, что способствует увеличению времени контакта фаз и более полному поглощению целевого компонента...». Время контакта (время пребывания) определяется только объемом, в котором движется газовая фаза и ее объемным расходом.

Поэтому увеличение слоя жидкости приведет к уменьшению пространства для газа и как следствие увеличения его скорости и сокращению времени пребывания (контакта).

- «...устанавливается равновесное остаточное содержание  $\text{NH}_3$  в газовой фазе после конденсации, что требует либо интенсификации конденсационного отделения ...»  
Интенсификацией на равновесие повлиять нельзя.

- «Второй класс – интегрированные аппараты, в которых два механизма реализуются в одном устройстве». Не механизма, а процесса. Два процесса протекающие в одном аппарате называются совмещенными.

2. Уравнение 2.2 для сопротивления в жидкой фазе записано не корректно по следующим причинам:

- не совпадёт размерность с сопротивлением мембраны 2.3;

- не учитываются другие механизмы переноса массы в пленке абсорбента кроме диффузионного. Так как по конструкции ячейки в слое жидкости происходит барботаж, нужно учитывать конвективный и турбулентные механизмы и описывать массоперенос в жидкой фазе коэффициентом массоотдачи а не диффузии;

- качественно неверное поведение - больший коэффициент Генри меньшая растворимость, а значит большее сопротивление стадии абсорбции. В уравнении 2.2 зависимость от коэффициента Генри обратная.

3. Как регулировалась доля отбора? Что означает доля отбора 1? Если это значит, что ретанта не было, о какой селективности тогда может идти речь?

Заключение по работе положительное. Отмечено, что приведенные выше вопросы и замечания не носят принципиального характера и не снижают научной и практической значимости диссертационной работы. В целом работа Крючкова С.С. является завершенным научно-квалификационным исследованием, в котором решена актуальная задача в области мембранной технологии и совмещенных процессов газоразделения. Представленные результаты обладают научной новизной, теоретической и практической значимостью, а выводы являются обоснованными и достоверными.

Общее заключение и оценка представленной диссертационной работы:

По тематике, постановке задачи, используемым методам исследования и полученным результатам диссертационная работа Крючкова Сергея Сергеевича соответствует паспорту специальности 2.6.15. «Мембраны и мембранная технология», в частности п. 3. Разработка принципов функционирования мембран различного назначения (обратноосмотических, нано-, ультра-, микрофльтрационных, перапорационных, ионообменных, газоразделительных) при мембранном разделении компонентов жидких и газовых смесей, в том числе в мембранных контакторах и мембранном катализе; п. 4. Технологические схемы с применением мембранных процессов, их экономическое и экологическое обоснование; п. 5. Мембранные процессы очистки, извлечения (кондиционирования) жидких и газообразных энергоносителей из смесей их содержащих природного, биогенного и техногенного происхождения. Комбинированные и гибридные процессы мембранной технологии (сочетание мембранных процессов с другими процессами химической технологии: абсорбцией, адсорбцией, ректификацией, дистилляцией).

Диссертация Крючкова Сергея Сергеевича на тему «Физико-химические основы мембранно-абсорбционного газоразделения техногенных газов» удовлетворяет

требованиям к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, определенным Положением о порядке присуждения ученых степеней в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева», утвержденным приказом и.о. ректора РХТУ им. Д.И. Менделеева от 14.09.2023 г. № 103ОД, а ее автор, Крючков Сергей Сергеевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.15. Мембраны и мембранная технология.

Диссертация, автореферат и отзыв были рассмотрены и одобрены на заседании кафедры «Процессы и аппараты химической технологии» (протокол № 7 от «02» апреля 2026 г.)

4. Отзыв на автореферат кандидата химических наук, доцента кафедры аналитической химии Института химии Санкт-Петербургского государственного университета Дмитриенко Марии Евгеньевны. Отзыв положительный. По автореферату имеются некоторые замечания и вопросы:

1. Хотелось бы видеть более явное обсуждение перспектив масштабирования волоконного модуля и перехода от лабораторной конструкции к аппарату большей производительности.

2. Представляется важным более четко обозначить, как соотносятся между собой критерии оптимизации процесса: максимальная чистота пермеата, степень извлечения аммиака и устойчивость режима.

3. В автореферате недостаточно отражен вопрос о долговременной стабильности наиболее эффективных абсорбентов при продолжительной эксплуатации.

Высказанные замечания не влияют на общую положительную оценку работы. Автореферат позволяет заключить, что диссертация Крючкова Сергея Сергеевича является законченной научно-квалификационной работой, в которой решена актуальная задача в области мембранной технологии и гибридных процессов газоразделения. Работа обладает научной новизной, имеет теоретическое и практическое значение и соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, определенным Положением о порядке присуждения ученых степеней в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева», утвержденным приказом и.о. ректора РХТУ им. Д.И. Менделеева от 14.09.2023 г. № 103ОД, а ее автор, Крючков Сергей Сергеевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.15. Мембраны и мембранная технология.

5. Отзыв на автореферат доктора химических наук, доцента, профессора кафедры физической химии ФГБОУ ВО «Кубанский государственный университет» Шкирской Светланы Алексеевны. Отзыв положительный. После ознакомления с авторефератом возникают следующие замечания и вопросы:

1. Из текста автореферата не в полной мере ясно, насколько устойчивы абсорбенты на основе  $\text{NH}_4\text{SCN}$  при длительной работе и многократных циклах насыщения и возможной регенерации. Поскольку данные системы отнесены автором к числу наиболее перспективных, было бы полезно кратко обозначить ожидаемые ограничения их длительной эксплуатации.

2. Представленные результаты по снижению концентрации аммиака в рецикле и концентрированию  $\text{NH}_3$  в пермеате выглядят весьма убедительно, однако в автореферате практически не обсуждается возможный энергетический эффект от внедрения такого узла в схему синтеза аммиака. Даже укрупненная оценка позволила бы лучше показать прикладной потенциал работы.

3. Было бы интересно видеть более явное сопоставление плоскокамерной и волоконной конфигураций не только по концентрационным показателям, но и по производительности процесса, что позволило бы нагляднее показать преимущества разработанного модуля типа «волокно в волокне».

Высказанные замечания не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы. Автореферат и опубликованные работы автора позволяют заключить, что диссертация Крюкова Сергея Сергеевича является законченной научно-квалификационной работой, в которой решена актуальная задача в области мембранной технологии и гибридных процессов газоразделения, имеющая как теоретическое, так и практическое значение. По своему содержанию работа соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, определенным Положением о порядке присуждения ученых степеней в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева», утвержденным приказом и.о. ректора РХТУ им. Д.И. Менделеева от 14.09.2023 г. № 103ОД, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.15 Мембраны и мембранная технология.

6. Отзыв на автореферат кандидата технических наук, доцента факультета наук о материалах федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» Пояркова Андрея Александровича.

Отзыв положительный. По автореферату имеются следующие замечания.

1. В автореферате основное внимание уделено экспериментальному исследованию процесса, в то время как теоретическое описание носит более общий характер. В этой связи представляется целесообразным несколько подробнее раскрыть используемые представления о механизме массопереноса в системе «газ – жидкость – мембрана» и показать, каким образом они соотносятся с полученными экспериментальными результатами.

2. При рассмотрении влияния различных параметров процесса (свойства мембраны, состав абсорбента, толщина жидкого слоя) результаты приведены последовательно и достаточно наглядно. Вместе с тем, было бы полезно дополнительно обсудить их в совокупности, с точки зрения формирования обобщенного подхода к выбору условий проведения мембранно-абсорбционного разделения.

3. В работе предложено конструктивное решение волоконного модуля, представляющее значительный интерес. В то же время, в автореферате этот результат в большей степени раскрыт с экспериментальной стороны, и представляется желательным более подробно обозначить общие принципы, которые могут быть использованы при дальнейшем масштабировании и инженерной реализации подобных аппаратов.

4. Практическая значимость работы не вызывает сомнений, однако для более полной оценки потенциала предложенного подхода было бы полезно в обобщенном виде

сопоставить его с традиционными методами выделения аммиака, в том числе с точки зрения энергетических и технологических характеристик.

5. Рассмотренные в работе модельные газовые смеси адекватно отражают поставленные исследовательские задачи. Вместе с тем, для полноты изложения можно было бы кратко обозначить возможные ограничения и особенности применения предложенного подхода к более сложным по составу промышленным газовым потокам.

Высказанные замечания не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы. По материалам автореферата можно заключить, что диссертация Крючкова Сергея Сергеевича является законченной научно-квалификационной работой, в которой решена актуальная задача в области мембранной технологии и гибридных процессов газоразделения. Работа обладает научной новизной, имеет теоретическое и практическое значение и соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, определенным Положением о порядке присуждения ученых степеней в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева», утвержденным приказом и.о. ректора РХТУ им. Д.И. Менделеева от 14.09.2023 г. № 103ОД, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.15 Мембраны и мембранная технология.

7. Отзыв на автореферат кандидата химических наук, ведущего научного сотрудника НИЛ инженерной химии Научно-исследовательского института химии Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского (ННГУ) Казариной Ольги Викторовны. Отзыв положительный. По автореферату имеются следующие замечания:

1. Из предоставленного текста автореферата не вполне ясно, какой критерий принимался за целевую функцию при оптимизации рабочего режима полволоконного модуля: достижение предельной концентрации аммиака в пермеате, минимизация его потерь с потоком ретентата или обеспечение максимальной временной стабильности процесса. Желательно более четко обозначить приоритетность данных параметров для практической реализации метода МАГ.

2. Представляется целесообразным более детально осветить влияние инертных компонентов (в частности, аргона и метана), на общую эффективность мембранно-абсорбционного процесса и на выбор режима его проведения.

3. В работе получен большой массив данных по новым мембранно-абсорбционным системам. Было бы полезно более отчетливо дифференцировать результаты исследования: выделить фундаментальные закономерности массопереноса, универсальные для гибридных МАГ-процессов, и специфические прикладные выводы, характерные исключительно для задачи выделения аммиака из рециркуляционного газа процесса Габера-Боша.

Сделанные замечания не снижают общей положительной оценки работы. По материалам автореферата можно заключить, что диссертация Крючкова Сергея Сергеевича представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой решена актуальная задача в области мембранной технологии и гибридных процессов разделения газовых смесей. Работа обладает научной новизной, имеет теоретическую и практическую значимость и соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям,

определенным Положением о порядке присуждения ученых степеней в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева», утвержденным приказом и.о. ректора РХТУ им. Д.И. Менделеева от 14.09.2023 г. № 103ОД, а ее автор, Крючков Сергей Сергеевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.15 Мембраны и мембранная технология.

На все замечания Крючковым Сергеем Сергеевичем даны полные и исчерпывающие ответы.

Выбор официальных оппонентов основывается на их компетентности в соответствующей отрасли науки, наличии у них публикаций по научной специальности и тематике защищаемой диссертационной работы. В качестве ведущей организации выбрана организация, широко известная своими достижениями в соответствующей отрасли науки и способная определить научную и практическую ценности диссертации.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

1. Сформулирована научно-техническая задача разработки физико-химических основ и технических решений для повышения эффективности выделения аммиака из рециркуляционного газа процесса Габера-Боша методом мембранно-абсорбционного газоразделения.

2. Определены условия и технологические схемы для проведения процесса выделения аммиака из аммиак-содержащих бинарной, тройной и пятикомпонентной газовых смесей.

3. Выбраны наиболее перспективные пары мембраны и абсорбента для проведения процесса мембранно-абсорбционного газоразделения для выделения аммиака из рециркуляционного газа процесса Габера-Боша.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

- установлены закономерности массопереноса в системе «газ – абсорбент – мембрана», включая влияние сорбционных свойств абсорбента и транспортных характеристик мембран на эффективность разделения аммиакосодержащих газовых смесей;
- развиты научные представления о механизмах мембранно-абсорбционного газоразделения, в том числе о роли толщины жидкого слоя абсорбента и его физико-химических свойств в формировании селективности и производительности процесса;
- сформированы новые подходы к описанию взаимосвязи между структурой и свойствами полимерных мембран, сорбционными характеристиками жидких сред и параметрами совмещенного процесса, что расширяет существующие модели совмещенных газоразделительных процессов;
- обоснованы принципы интенсификации процессов выделения аммиака за счет комбинирования мембранного и абсорбционного процессов, что дополняет теорию совмещенных процессов разделения газовых смесей.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

- разработана и создана экспериментальная установка мембранно-абсорбционного газоразделения с полволоконным модулем оригинальной конструкции («волокно в

волокне»), позволяющая реализовать равномерный контакт газовой смеси с абсорбентом и эффективный отвод целевого компонента;

- созданный полволоконный модуль МАГ позволяет снизить содержание аммиака в модельном рецикле с 4,5 до 1,5 об.% и получить пермеат с концентрацией  $\text{NH}_3$  до 97,5 об.% при использовании в качестве продувочного газа азотоводородной смеси;

- установлены условия, технологическая схема, материалы мембраны и абсорбента для выделения аммиака из пятикомпонентной смеси рециркуляционного контура процесса Габера-Боша с применением полволоконного мембранно-абсорбционного газоразделительного модуля;

- предложена и обоснована схема использования части технологического потока (азотоводородной смеси) для продувки полости низкого давления, что повышает движущую силу процесса и снижает содержание примесей в пермеате.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

Достоверность результатов работы обеспечена высоким теоретическим и экспериментальным уровнем исследований; воспроизводимостью результатов; системным подходом к анализу работ в области процессов и аппаратов химической технологии и мембранного газоразделения и применением современного высокоточного оборудования, а также традиционных методов и подходов к представлению и численной обработке экспериментальных данных.

Личный вклад соискателя: заключается в непосредственном формулировании цели и задачи работы, выборе методов исследования, проведения анализа и обработке полученных результатов. Автор принимал непосредственное участие в проектировании и монтаже экспериментальной установки, проведении экспериментальной работы, статистической обработке полученных результатов и их интерпретации, формулировании выводов и положений и подготовке публикаций

По своему содержанию диссертация отвечает паспорту научной специальности 2.6.15. Мембраны и мембранная технология в части п. 3. Разработка принципов функционирования мембран различного назначения (обратноосмотических, нано-, ультра-, микрофильтрационных, первапорационных, ионообменных, газоразделительных) при мембранном разделении компонентов жидких и газовых смесей, в том числе в мембранных контакторах и мембранном катализе; п. 4. Технологические схемы с применением мембранных процессов, их экономическое и экологическое обоснование; п. 5. Мембранные процессы очистки, извлечения (кондиционирования) жидких и газообразных энергоносителей из смесей их содержащих природного, биогенного и техногенного происхождения. Комбинированные и гибридные процессы мембранной технологии (сочетание мембранных процессов с другими процессами химической технологии: абсорбцией, адсорбцией, ректификацией, дистилляцией).

По актуальности, новизне, теоретической и практической значимости диссертация соответствует требованиям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева», утвержденным приказом и.о. ректора РХТУ им. Д.И. Менделеева от 14.09.2023 г. №103ОД.

На заседании диссертационного совета РХТУ.2.6.08 РХТУ им. Д.И. Менделеева 24 апреля 2026 г., принято решение о присуждении ученой степени кандидата технических наук Крючкову Сергею Сергеевичу.

Присутствовало на заседании 10 человек, в том числе докторов наук по научной специальности, отрасли науки рассматриваемой диссертации 9 человек, в том числе в режиме видеоконференции 3 человек.

При проведении голосования члены диссертационного совета по вопросу присуждения ученой степени проголосовали:

Результаты тайного голосования:

«за» 6,

«против» 0,

«воздержались» 0.

Проголосовали 3 членов диссертационного совета, присутствовавшие на заседании в режиме видеоконференции:

«за» 3,

«против» 0,

«воздержались» 0.

**Итоги голосования:**

«за» 9,

«против» 0,

«воздержались» 0.

Председатель  
диссертационного совета

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
«24» апреля 2026 г.

Г.Г. Каграманов, профессор

к.т.н. Атласкин А.А.