

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.2.479.05,  
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО  
ОБРАЗОВАНИЯ «УФИМСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ НАУКИ И  
ТЕХНОЛОГИЙ» МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО  
ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ПО ДИССЕРТАЦИИ  
НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_

решение диссертационного совета от 24 декабря 2025 г. № 17

О присуждении Анисимовой Марии Александровне, гражданину РФ, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Математическое моделирование процессов разделения смеси азота и кислорода с помощью селективной мембраны» по научной специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы принята к защите 16 октября 2025 года (протокол заседания № 15) диссертационным советом 24.2.479.05, созданным на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский университет науки и технологий» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (450076, г. Уфа, ул. Заки Валиди, д. 32), приказ № 520/нк от 24.03.2023 г.

Соискатель Анисимова Мария Александровна, 11 июня 1998 года рождения. В 2022 году соискатель окончила Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Тюменский государственный университет» по направлению подготовки 01.04.01 Математика, профиль: Вычислительная механика с присвоением квалификации Магистр.

С 2022 года соискатель обучается в аспирантуре по очной форме обучения Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования "Тюменский государственный университет" по направлению подготовки 01.06.01 - Математика и механика, профиль: 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы.

Работает в должности младшего научного сотрудника отдела анализа эксплуатации промышленных объектов Общества с ограниченной ответственностью "Научно-исследовательский институт природных газов и газовых технологий - Газпром ВНИИГАЗ" Публичного акционерного общества "Газпром".

Диссертация выполнена на кафедре моделирования физических процессов и систем Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования "Тюменский государственный университет" Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Научный руководитель - доктор физико-математических наук (1.3.14. Теплофизика и теоретическая теплотехника), *на момент написания отзыва – кандидат физико-математических наук (01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы)*, доцент Шевелёв Александр Павлович, профессор кафедры моделирования физических процессов и систем Школы естественных наук Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования "Тюменский государственный университет".

Официальные оппоненты:

1. Мирзоев Акмал Ахадович, доктор физико-математических наук (01.02.05 - Механика жидкости, газа и плазмы), профессор, Институт механики и сейсмостойкости сооружений им. М.Т. Уразбаева Академии наук Республики Узбекистан, лаборатория механики жидкости, газа и систем гидроприводов, главный научный сотрудник;

2. Бельских Денис Сергеевич, кандидат физико-математических наук (1.3.14. Теплофизика и теоретическая теплотехника), Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук, Тюменский филиал, лаборатория гидродинамики многофазных сред, научный сотрудник

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное научное учреждение "Уфимский федеральный исследовательский центр Российской академии наук", г. Уфа, в своем положительном отзыве, подписанном Низамовой Аделиной Димовной, кандидатом физико-

математических наук (01.02.05 - Механика жидкости, газа и плазмы), старшим научным сотрудником лаборатории механики многофазных систем Института механики им. Р.Р. Мавлютова, Галимзяновым Маратом Назиповичем, доктором физико-математических наук (1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы), доцентом, и.о. директора Института механики им. Р.Р. Мавлютова, и утвержденном Шаяхметовым Ильдусом Фаатовичем, кандидатом биологических наук, доцентом, врио руководителя, указала, что диссертационная работа Анисимовой Марии Александровны на тему «Математическое моделирование процессов разделения смеси азота и кислорода с помощью селективной мембраны» является законченной научно-квалификационной работой, соответствующей требованиям пунктов 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 года, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук.

Соискатель имеет 10 опубликованных работ. Из них 2 – в изданиях, включенных в базы данных Web of Science и Scopus, 8 – в изданиях, входящих в РИНЦ. Получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Общий объем – 2,7 печ. л., авторский вклад – 0,9 печ. л.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1. Анисимова М.А., Гильманов А.Я., Кузнецов А.В., Шевелёв А.П. Математическое моделирование разделения смеси азота и кислорода с помощью селективной мембраны // Инженерно-физический журнал. - 2023. - Т. 96, № 6. - С. 1552-1558.

2. Ганопольский Р.М., Гильманов А.Я., Деменчук М.А., Дмитриев И.О., Федоров К.М., Шевелев А.П. Методы определения коэффициента проницаемости селективно-проницаемых мембран // Инженерно-физический журнал. - 2021. - Т. 94, № 1. - С. 234-239.

В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем работах.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

1. Ведущей организации – Федерального государственного

бюджетного научного учреждения "Уфимский федеральный исследовательский центр Российской академии наук", г. Уфа. Отзыв положительный. Имеются замечания: 1) В диссертационном исследовании представлена детально проработанная физико-математическая модель, валидированная для бинарной системы азот-кислород. Будет ли работать модель с другой парой газов? 2) Недостаточно освещен вопрос влияния дефектов мембраны и неоднородности ее структуры на процесс разделения газов. 3) Насколько существенно упрощенная модель (3.2.3)-(3.2.6) искажает физическую картину процесса по сравнению с полной моделью (2.2.31)-(2.2.34), особенно в приграничных областях (вход/выход из мембраны)? 4) В разделе 3.4 проводится валидация упрощенной модели путем сравнения с литературными данными. Полученная погрешность в 20% характеризуется как удовлетворительная, однако обоснование такого вывода отсутствует. 5) В диссертации на основании модельных расчётов приведены асимптотические кривые изменения концентрации кислорода и азота с течением времени. Можно ли предсказать остаточные концентрации газов в реальных условиях производства, используя расчётные данные?

2. Официального оппонента, доктора физико-математических наук, профессора, главного научного сотрудника лаборатории механики жидкости, газа и систем гидроприводов Института механики и сейсмостойкости сооружений им. М.Т. Уразбаева Академии наук Республики Узбекистан Мирзоева Акмала Ахадовича. Отзыв положительный. Имеются замечания: 1) В работе рассматривается изотермическая модель, однако в реальных промышленных мембранных установках, особенно при высоких давлениях и скоростях потока, возможны существенные температурные эффекты. 2) На рис. 2.4 показано, что увеличение проницаемости мембраны сокращает время выхода на стационарный режим, но негативно сказывается на чистоте азота. Однако количественная связь между этими ключевыми параметрами не установлена. 3) В работе введены и проанализированы безразмерные комплексы (A1-A4), однако их физическая интерпретация и, что важнее, практические рекомендации по их использованию для проектирования мембранных модулей представлены недостаточно полно. 4) При использовании явной конечно-разностной схемы целесообразно обсуждение

вопросов устойчивости численного решения (например, выполнение условия Куранта).

3. Официального оппонента, кандидата физико-математических наук, научного сотрудника лаборатории гидродинамики многофазных сред Тюменского филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук Бельских Дениса Сергеевича. Отзыв положительный. Имеются замечания: 1) В работе рассматривается модель с одним мембранным волокном. Насколько полученные выводы можно перенести на реальный промышленный модуль, который состоит из тысяч таких волокон? 2) Чувствительна ли модель к присутствию третьего компонента? Планируется ли в дальнейшем обобщение модели на многокомпонентные смеси? 3) На стр. 54 в последнем абзаце сказано, что уравнение (2.2.21) отражает изменение массы внутри волокна мембраны. Однако ранее на стр. 53 в описании уравнения было сказано, что оно описывает движение потока вне волокна мембраны. 4) На стр. 64-65 автор ссылается на уравнения (3.1.5)-(3.1.8), которые не представлены в разделе 3.1. Возможно, автор имел в виду систему уравнений (3.2.1)-(3.2.4) из раздела 3.2? 5) В разделе 3.3 введен критерий  $K_{eff}$  для разграничения режимов с преобладанием фильтрации или диффузии. Почему его пороговое значение принято равным единице без какого-либо физического или математического обоснования? 6) Также в работе присутствует некоторое количество ошибок, связанных с общим оформлением. Например, на стр. 34 есть ошибка в ссылке на список литературы; на стр. 52 говорится про  $i$ -ую компоненту, а в самом уравнении (2.2.11) используется индекс  $k$ ; также имеются два рисунка 2.3 на стр. 51 и 55.

4. Доктора физико-математических наук, профессора, ведущего научного сотрудника, заведующего лабораторией математического моделирования процессов фильтрации Института механики и машиностроения - структурного подразделения Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра "Казанский научный центр Российской академии

наук" Никифорова Анатолия Ивановича. Отзыв положительный. Имеется замечание: Чем обоснован выбор закона Дарси в качестве уравнения, определяющего скорость компонентов разделяемых газов?

5. Кандидата физико-математических наук, ведущего инженера отдела концептуального инжиниринга и оперативных задач Общества с ограниченной ответственностью "Новатэк Научно-технический центр" Самсонова Кирилла Юрьевича. Отзыв положительный. Вопросов и замечаний нет.

6. Кандидата физико-математических наук, доцента, эксперта Общества с ограниченной ответственностью "Газпромнефть Научно-технический центр" Кадочниковой Лилии Михайловны. Отзыв положительный. Имеется замечание: При анализе распределения концентраций в главе 3 отмечается изменение концентрации азота на 1% при преобладании диффузии. Однако в работе отсутствует оценка чувствительности этого результата к возможным колебаниям входных параметров (давления на входе, температуры, геометрических характеристик мембраны). Проведение анализа чувствительности позволило бы оценить устойчивость полученных выводов и определить наиболее критичные параметры, влияющие на эффективность разделения, что имеет важное значение для практического применения модели.

7. Кандидата физико-математических наук, доцента, заведующего лабораторией петрофизики Тюменского отделения Сургутского научно-исследовательского и проектного института "СургутНИПИнефть" Открытого акционерного общества "Сургутнефтегаз" Вольфа Альберта Альбертовича. Отзыв положительный. Имеется замечание: При изложении таких сложных математических моделей необходимо приведение либо отдельного списка обозначений, либо строго и четкого их описания после каждой приведенной формулы или системы уравнений. К сожалению, в представленной работе отсутствует и то, и другое. В связи с этим требует пояснения понятия коэффициента проводимости, приведенного на странице 14 и странице 17 автореферата.

8. Кандидата физико-математических наук, доцента, заведующего кафедрой физики и приборостроения Института промышленных технологий

и инжиниринга Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Тюменский индустриальный университет" Третьякова Петра Юрьевича. Отзыв положительный. Имеется замечание: Хотелось бы видеть в автореферате более развернутое качественное обсуждение физического смысла и границ применимости введенного критерия Keff. В частности, как будет вести себя данный критерий для мембран с существенно иными геометрическими параметрами (например, значительно большей или меньшей длиной) или для газовых смесей с иными физико-химическими свойствами? Такое обсуждение усилило бы прогностическую силу предложенной модели.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается их высокой профессиональной квалификацией, наличием публикаций по проблематике, связанной с темой диссертации, компетенцией в вопросах, имеющих отношение к теме работы. Ведущая организация и оппоненты не имеют совместных проектов и публикаций с соискателем.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

- разработана физико-математическая модель процесса разделения многокомпонентной газовой смеси (азота и кислорода) с учётом продольного массопереноса входящего и выходящего газовых потоков вдоль селективной пористой мембраны, позволяющая определять зависимость концентрации получаемых компонентов от скорости подачи газа;
- получено, что проницаемость мембраны существенно влияет на время выхода системы на стационарный режим: с её увеличением время установления стационарного распределения концентрации сокращается, при этом снижается и концентрация отбираемого газа;
- установлено, что процесс разделения может протекать в двух режимах – с преобладанием фильтрации или диффузии, каждый из которых определяет преимущественное выделение азота (при фильтрации) или кислорода (при диффузии);
- введён критерий, определяющий преобладание градиента давления или градиента концентрации в процессе массопереноса через мембрану;

- предложены безразмерные комплексы подобия, позволяющие оценивать влияние продольного массопереноса и геометрических параметров мембраны на эффективность разделения газа на компоненты;
- разработан метод определения коэффициентов проводимости компонентов газовой смеси по динамике давления в ячейках, разделённых мембраной.

Теоретическая значимость полученных соискателем результатов исследования заключается в том, что создана математическая модель, объединяющая внутренний и внешний потоки относительно мембраны, а также поток через неё в единой постановке; на основе критериального анализа безразмерных комплексов показано, что система уравнений, описывающих процесс, может быть существенно упрощена без потери физической адекватности модели; установлены аналитические зависимости, связывающие коэффициент селективности с динамикой выравнивания давления в ячейках, разделённых мембраной.

Практическая значимость исследования заключается в том, что разработанная математическая модель позволяет обоснованно выбирать режимы работы мембранных установок для получения целевого компонента (азота или кислорода) с требуемой чистотой; полученные зависимости между проницаемостью мембраны, временем выхода на стационарный режим и концентрацией продукта могут быть использованы для оптимизации технологических параметров промышленных установок.

Оценка достоверности результатов исследования обоснована применением уравнений сохранения массы и закона Дарси, физически обоснованными допущениями, использованием апробированных методов численного моделирования, а также валидацией результатов путём сопоставления с данными промышленных установок и экспериментальными зависимостями.

Личный вклад соискателя состоит в самостоятельной разработке физико-математической модели, получении численных и аналитических решений, проведении анализа результатов, разработке программного обеспечения, а также в подготовке и апробации материалов диссертации на конференциях и в научных публикациях.



В ходе защиты диссертации было высказано замечание, что в работе отсутствуют чёткие практические рекомендации по выбору конкретных параметров мембранных установок таких, как оптимальная проницаемость, соотношение давлений или длина модуля для достижения заданных технологических показателей в реальных производственных условиях. С этим замечанием соискатель Анисимова М.А. согласилась и ответила, что разработка детальных практических рекомендаций действительно является логичным и необходимым следующим шагом в развитии данной работы.

На заседании 24 декабря 2025 г. диссертационный совет принял решение: за разработку физически обоснованной математической модели мембранного газоразделения, установившей количественную связь между параметрами процесса и чистотой продукта, и за введение критерия выбора режима работы мембранной установки присудить Анисимовой Марии Александровне ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 12 человек, из них 7 докторов физико-математических наук по профилю рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 17 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за – 12, против – нет.

Заместитель председателя  
диссертационного совета

д.т.н., проф.



Валиуллин Рим Абдуллович

Ученый секретарь  
диссертационного совета

к.ф.-м.н., доц.

Киреев Виктор Николаевич

24 декабря 2025 г.