

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА

РХТУ.05.02 РХТУ им. Д.И. Менделеева
по диссертации на соискание ученой степени кандидата наук

аттестационное дело № 14/20
решение диссертационного совета
от 26 ноября 2020 г. №4

О присуждении ученой степени кандидата технических наук Атласкину Артему Анатольевичу, представившего диссертационную работу на тему «Разделение газовых смесей в мембранном каскаде типа «Непрерывная мембранная колонна» по научной специальности 05.17.18 Мембраны и мембранная технология, принята к защите 15 октября 2020, протокол №3 диссертационным советом РХТУ.05.02 РХТУ им. Д.И. Менделеева.

Состав диссертационного совета утвержден в количестве 18 человек приказом ректора РХТУ им. Д.И. Менделеева № 94 ОД от « 23 » декабря 2019 г.

Соискатель Атласкин Артем Анатольевич 1992 года рождения. В 2016 году окончил федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», диплом серия 105205 номер 0077496.

В 2020 году окончил аспирантуру федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», диплом серия 105205 номер 0009862.

Соискатель работает инженером в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева».

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева».

Научный руководитель профессор, доктор технических наук Воротынцев Илья Владимирович.

Официальные оппоненты:

д.т.н., проф. Каграманов Георгий Гайкович, заведующий кафедрой мембранной технологии ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева»,

д.х.н. Пенькова Анастасия Владимировна доцент кафедры аналитической химии ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет»,

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Ордена Трудового Красного Знамени Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева Российской академии наук».

Основные положения и выводы диссертационного исследования в полной мере изложены в 15 научных работах, опубликованных соискателем, в том числе в 2 публикациях в изданиях, индексируемых в международных базах данных, и в 2 публикациях в рецензируемых изданиях.

Две публикации в журнале Journal of Membrane Science первого квартала с импакт фактором 7,183, индексируемом в международных базах цитирования Web of Science и Scopus:

1. Atlaskin A.A., Trubyanov M.M., Yanbikov N.R., Vorotyntsev A.V., Drozdov P.N., Vorotyntsev V.M., Vorotyntsev I.V. Comprehensive experimental study of membrane cascades type of «continuous membrane column» for gases high-purification // Journal of Membrane Science. 2019. Vol. 572. p. 92-101. Работа посвящена всестороннему экспериментальному

изучению мембранного каскада типа «Непрерывная мембранная колонна» на примере глубокой очистки газов и при различных режимах работы (безотборный и близкий к безотборному).

2. Trubyanov M.M., Kirillov S.Y., Vorotyntsev A.V., Sazanova T.S., Atlaskin A.A., Petukhov A.N., Kirillov Y.P., Vorotyntsev I.V. Dynamic behavior of unsteady-state membrane gas separation: Modelling of a closed-mode operation for a membrane module // *Journal of Membrane Science*. 2019. Vol. 587. 117173.

В работе предложена математическая модель массообмена в радиальном мембранном модуле. Особое внимание уделяется безотборному этапу при проведении процесса в нестационарных условиях

Две публикации в журнале «Мембраны и мембранные технологии», включенным в перечень ВАК и имеющим переводную версию «Membranes and Membrane Technologies» (ранее – «Petroleum Chemistry»), индексируемом в международной базе цитирования Web of Science:

1. Атласкин А.А., Трубянов М.М., Янбиков Н.Р., Буковский М.В., Дроздов П.Н., Воротынцев В.М., Воротынцев И.В. Безотборный режим работы аппаратов типа мембранная колонна в процессе удаления легкопроникающей примеси при глубокой очистке газов // *Мембраны и мембранные технологии*. 2018. Т. 8, № 3. С. 196-206. (*Petroleum Chemistry*. 2018. Vol. 58, No. 6. p. 508-517.)

2. Атласкин А.А., Трубянов М.М., Янбиков Н.Р., Крючков С.С., Чадов А.А., Смородин К.А., Дроздов П.Н., Воротынцев В.М., Воротынцев И.В. Экспериментальная оценка эффективности мембранного каскада типа «Непрерывная мембранная колонна» в задачах выделения CO_2 // *Мембраны и мембранные технологии*. 2020. Т. 10, № 1. С. 42-53. (*Membranes and Membrane Technologies*. 2020. Vol. 2, No. 1. p. 35-44.)

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

1. Ведущей организации **ФГБУН «Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева Российской академии наук**, отзыв подписан профессором, д.х.н., главным научным сотрудником лаборатории «Полимерных мембран» Волковым В.В.

Отзыв положительный, в отзыве отражены актуальность темы, научная новизна, практическая значимость работы, достоверность полученных данных, общий обзор работы.

Присутствуют замечания по работе:

1. В диссертационной работе не приведено обоснование выбора газоразделительных мембран Лестосил и МДК-3. Почему были выбраны именно эти мембраны?

2. При изучении мембранного каскада в задачах глубокой очистки газов, эффективность разделения оценивается через коэффициент концентрирования – отношение концентрации легкопроникающего компонента (примеси) в потоке питающей смеси и потоке из секции извлечения. Почему используется именно такая величина, а не, например, фактор разделения?

3. В рамках экспериментального изучения мембранного каскада на примере выделения диоксида углерода из тройной газовой смеси для оценки изменения концентраций компонентов смеси в потоках из секции извлечения и обогащения использованы относительные величины. Такой подход затрудняет прочтение и не способствует лучшему пониманию изложенного материала.

4. В описании экспериментальных процедур не приведено обоснование выбора давления питающей смеси.

5. В математической модели мембранного радиального модуля приведено граничное условие второго рода на выходе потока ретентата (вблизи центральной части модуля) – уравнение (21), означающее отсутствие градиента концентрации, однако не дано его обоснование.

6. В главе, посвященной описанию математической модели, представлены

различные случаи организации потоков в мембранном модуле (поперечный ток, противоток, полное перемешивание, в ПВД и ПНД). Далее в главе с результатами на многих представленных зависимостях (рис. 56-59, 66, 67) приведены теоретические кривые, рассчитанные на основе разработанной математической модели и демонстрирующие хорошее соответствие с экспериментальными данными, но при этом не указано, какие из моделей организации потоков в мембранных модулях ТМК были выбраны для расчетов.

Заключение по работе положительное.

2. Официального оппонента профессора, д.т.н., заведующего кафедрой мембранной технологии ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева» **Каграманова Г.Г.**

В отзыве отражены актуальность темы, научная новизна, практическая значимость работы, достоверность полученных данных, общий обзор работы.

По диссертационной работе имеются следующие замечания:

1. В работе присутствует некоторое количество неудачных формулировок: «разделительный эффект», «закономерности функционирования различных схем», «зависимостей типа...», «математическая модель ... и адекватная задачам ...», «особенности проведения газоразделительного процесса»;

2. Первая задача работы – разработка математической модели. Не приведено ни одной ссылки на литературу, на основании которой была разработана модель.

3. Вывод к главе 4 («Для достижения максимальной эффективности аппарата концентрат примеси должен удаляться из секции обогащения с максимально возможной величиной потока») выглядит достаточно очевидным;

4. В тексте работы указано, что «в результате сравнения результатов расчета с экспериментально определенными значениями было установлено полное соответствие между этими зависимостями, как по характеру, так и по численным значениям. Однако, на многих графиках, например, на рисунке 7, видно, что только около 4 точек в пределах погрешности совпадают с теоретической кривой, поэтому говорить о полном соответствии неправильно».

Высказанные замечания носят частный характер, не снижают значимости полученных результатов и не оказывают существенного влияния на общую положительную оценку диссертационного исследования.

3. Официального оппонента, д.х.н., доцента кафедры аналитической химии ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет» **Пеньковой А.В.**

В отзыве отражены актуальность темы, научная новизна, практическая значимость работы, достоверность полученных данных, общий обзор работы.

По диссертационной работе имеются следующие замечания:

1. В разделе 2.1. «Изучение функционирования мембранного каскада типа «Непрерывная мембранная колонна» в различных режимах работы и оценка эффективности в задачах глубокой очистки газов» приводится описание экспериментальной установки и сообщается, что мембранный модуль 3 характеризуется существенно меньшей площадью мембраны. Чем обосновано использование такого мембранного модуля?

2. В заключительной части раздела 4.3. «Оценка эффективности выделения диоксида углерода в мембранном каскаде типа «Непрерывная мембранная колонна» автор отмечает, что полученные результаты свидетельствуют о неэффективности рассмотренного каскада. Далее, ссылаясь на низкую селективность мембраны и низкое содержание CO_2 в питающей смеси отмечает, что: «полученные результаты можно оценивать, как демонстрацию перспективности мембранного каскада».

3. В разделе 4.5.2. «Оценка эффективности разделения газовой смеси в трехмодульной конфигурации мембранного каскада типа «Непрерывная мембранная колонна» при реализации импульсного отбора из секции извлечения» продемонстрирована перспективность реализации процесса в таком режиме работы. Автор отмечает, что

наибольший прирост эффективности разделения наблюдается в области малых производительностей. При этом в тексте работы отсутствует обсуждение и объяснение полученных результатов. Чем объясняется увеличение разницы эффективности разделения газовой смеси при уменьшении производительности?

4. В том же разделе работы эффективность разделения в нестационарном и стационарном режимах работы, как отмечает автор, сравнивалась при одинаковой производительности мембранного каскада. Из текста диссертации неясно каким образом уравнивались производительности каскада при реализации непрерывного и импульсного отбора.

5. В главе 5 «Расчет промышленной технологической схемы мембранного каскада типа «Непрерывная мембранная колонна» для выделения диоксида углерода из дымовых газов ТЭЦ» рассматривается влияние технологических параметров процесса на чистоту выделяемого продукта и степень его выделения. При этом анализ влияния характеристик мембраны ограничивается изучением влияния ее селективности на чистоту выделяемого CO_2 . В связи с этим возникает вопрос о влиянии проницаемости мембраны на ключевые характеристики процесса.

4. Профессора, д.т.н., заведующего кафедрой «Технологии переработки полимеров и композиционных материалов» ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» **Дебердеева Т.Р.**

Отзыв положительный, с точки зрения недостатков следует отметить то, что в автореферате уделено слабое внимание сравнению с известными конфигурациями установок подобного типа и не раскрыты преимущества исследуемых мембранных каскадов.

5. Профессора, д.х.н., профессора кафедры физической химии ФГБОУ ВО «Кубанский государственный университет» **Конonenko Н.А.**

В отзыве на автореферат отмечается актуальность темы, отмечается, что в исследовании решены как фундаментальные, так и прикладные задачи, использованы современные методы исследования. При прочтении автореферата возникли вопросы и замечания:

1. В выводах указано, что в работе «выявлены зависимости динамического функционирования мембранного каскада от величины и соотношения потоков отбора, объемов и скорости отбора, продолжительности циклов отбора и безотборного периода для систем с величиной эффективной селективности в интервале от 2 до 78», однако в тексте автореферата отсутствует обсуждение этих результатов. На основании чего сделан такой вывод?

2. В рамках расчета и оптимизации технологической схемы для выделения диоксида углерода не изучается влияние такого важного фактора как газотранспортные характеристики мембраны. Очевидно, что проницаемость и селективность мембраны будут оказывать во многом определяющее влияние на чистоту и степень выделения диоксида углерода.

6. К.х.н., старшего научного сотрудника кафедры неорганической химии химического факультета ФГБОУ ВО «Московский государственный университет» **Петухова Д.И.**

Отзыв о работе положительный, в качестве недостатков отмечаются следующие:

1. Из текста автореферата остались непонятны критерии выбора мембран Лестосил и МДК-3, используемых для проведения процессов разделения.

2. На стр. 12 автореферата указано требование по площади мембраны в 52 780 м², которая необходима для выделения углекислого газа со степенью извлечения до 90 %. Однако из текста автореферата остается неясным производительность мембранного аппарата с такой площадью. Кроме того, на рисунке 6 указано давление в 0.26 МПа и 0.13 МПа,

непонятно, как в случае дымовых газов создавать данное давление сырьевого потока.

3. В качестве общего замечания к работе следует отметить, что описанные эксперименты проведены на сухих газовых смесях, в то время как реальные дымовые газы содержат достаточно большое количество паров воды.

7. Доцента, к.х.н., ведущего научного сотрудника ГНУ «Институт физико-органической химии Национальной академии наук Беларуси» **Плиско Т.В.**

Отзыв на автореферат положительный, по автореферату имеются следующие замечания:

1. В автореферате представлено сравнение эффективности разделения трех мембранных аппаратов на примере глубокой очистки газов: двух- и трехмодульная конфигурация мембранного каскада типа «Непрерывная мембранная колонна» и оригинальная непрерывная мембранная колонна. Проводилось ли сравнение эффективности выделения диоксида углерода в рассматриваемом мембранном каскаде с другими мембранными аппаратами, например, с той же непрерывной мембранной колонной?

2. Чем обусловлен выбор плоской конфигурации мембран для исследования в диссертационной работе? Известно, что полволоконные мембраны характеризуются более высокой плотностью упаковки в объеме мембранного аппарата, компактностью оборудования для организации мембранного процесса.

Отмеченные замечания носят уточняющий характер и не снижают общей высокой оценки работы.

8. К.х.н., проректора по научной работе ФГБОУ ВО «Ивановский государственный технический университет» **Марфина Ю.С.**

Отзыв в целом положительный, по автореферату имеются некоторые замечания:

1. В автореферате не комментируется выбор мембран. Чем обусловлено использование мембран Лестосил и МДК-3?

2. Среди выводов фигурирует следующая формулировка «Получены экспериментальные данные о зависимости эффективности разделения в мембранном каскаде в нестационарном режиме работы». В чем заключается нестационарность условий? Какие режимы работы были исследованы?

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается их компетентностью, достижениями в научных исследованиях с близкой тематикой, наличием у оппонентов и сотрудников ведущей организации публикаций в рецензируемых журналах и высоким профессиональным уровнем.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

- предложена технологическая схема для выделения диоксида углерода из дымовых газов ТЭЦ на основе трехмодульной конфигурации мембранного каскада типа «Непрерывная мембранная колонна» позволяющая получать диоксид углерода чистотой более 97 мол.% со степенью выделения более 93 %;

- доказана перспективность использования мембранного каскада типа «Непрерывная мембранная колонна» для глубокой очистки газов и выделения диоксида углерода из дымовых газов ТЭЦ; возможность интенсификации процесса газоразделения за счет реализации разделения в нестационарных условиях (импульсный отбор продукта из секции извлечения каскада);

- введен комплекс критериев для сравнения и оценки эффективности глубокой очистки газов в различных конфигурациях мембранного каскада типа «Непрерывная мембранная колонна» и оригинальной непрерывной мембранной колонны,

- доказана возможность интенсификации процесса глубокой очистки газов в мембранном каскаде типа «Непрерывная мембранная колонна» при проведении процесса в

нестационарных условиях, а именно при осуществлении импульсного отбора из секции извлечения.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что: (исправлены формулировки в соответствии с рекомендациями членов совета)

-отмечено качественное согласие результатов расчета с использованием разработанной математической модели с результатами эксперимента;

-разработана математическая модель массообмена в радиальном мембранном модуле описывающая изменение состава газовой смеси в процессе разделения в зависимости от технологических параметров и учитывающая различные варианты организации потоков в мембранном модуле;

-дано математическое описание разделительного процесса в двух- и трехмодульной конфигурациях мембранного каскада типа «Непрерывная мембранная колонна» удовлетворительно согласующееся с экспериментальными данным полученными при осуществлении глубокой очистки газов и выделении диоксида углерода из дымовых газов ТЭЦ.

применительно к проблематике диссертации результативно использован комплекс существующих базовых методов исследования, в том числе метод газовой хроматографии, метод математического моделирования, статистической обработки данных,

изложены особенности функционирования мембранного каскада типа «Непрерывная мембранная колонна» в различных режимах работы (безотборный, близкий к безотборному, нестационарные условия проведения процесса), определена динамика установления стационарного состояния.

раскрыты зависимости динамического функционирования мембранного каскада от величины и соотношения потоков отбора, объемов и скорости отбора, продолжительности циклов отбора и безотборного периода для систем с величиной эффективной селективности в широком интервале.

изучены взаимное влияние разделительных процессов в секциях извлечения и обогащения мембранного каскада. Показано, что для достижения высокой чистоты труднопроникающего компонента процесс следует проводить при максимально возможной доле отбора из секции обогащения; при выделении CO_2 из дымовых газов ТЭЦ процесс следует проводить при низких значениях доли отбора из секции обогащения.

проведена модернизация математической модели массообмена в мембранном каскаде типа «Непрерывная мембранная колонна» на базе радиальных мембранных модулей.

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

-разработан и внедрен экспериментальный стенд для комплексного изучения закономерностей функционирования различных конфигураций мембранного каскада типа «Непрерывная мембранная колонна» (для использования в лаборатории мембранных и каталитических процессов Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева);

- разработана и внедрена в технологическую среду Aspen Plus модель промышленной технологической схемы мембранного каскада на базе трехмодульной конфигурации для выделения диоксида углерода из дымовых газов ТЭЦ;

- определены зависимости эффективности разделения различных газовых смесей (для процессов глубокой очистки и выделения диоксида углерода из дымовых газов ТЭЦ) от производительности мембранного каскада. Продемонстрирована перспективность применения мембранного каскада для решения этих задач;

-создана математическая модель массообмена в мембранном каскаде, описывающая изменение состава бинарной газовой смеси и учитывающая влияния ряда технологических параметров и организации потоков в мембранном модуле;

- представлены расчет промышленной технологической схемы мембранного каскада на базе трехмодульной конфигурации для выделения диоксида углерода из дымовых газов

ТЭЦ; рекомендации по многопараметрической оптимизации предложенной технологической схемы; технико-экономическое обоснование целесообразности применения рассчитанной технологической схемы в промышленности.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

-для экспериментальных работ достоверность полученных результатов обеспечивалась применением современных методов анализа (газовая хроматография, газотранспортные испытания), реализованных с использованием сертифицированного оборудования (газовые хроматографы на базе Хромос GX-1000, укомплектованные детектором по теплопроводности, пламенно-ионизационным детектором и гелий-разрядным ионизационным детектором, контрольно-измерительные приборы компании Bronkhorst) и программных продуктов (программное обеспечение Хромос™, FlowPlot™, FlowView™, FlowTune™). Теория согласуется с представленным экспериментальными данными и с опубликованными результатами, представленными в области изучения мембранных процессов, идея базируется на анализе ранее полученных и собственных результатов в области глубокой очистки газов мембранным методом, обобщении передового опыта в области выделения диоксида углерода из дымовых газов ТЭЦ;

-использованы актуальные литературные источники со сравнительным анализом существующих критериев оценки эффективности разделения газовых смесей в мембранных аппаратах;

-установленные автором особенности функционирования мембранного каскада типа «Непрерывная мембранная колонна» демонстрируют качественное согласие с результатами, представленными в независимых источниках по этой тематике для других мембранных аппаратов такого типа с точки зрения характера определенных зависимостей;

-использованы современные методики сбора и обработки исходной информации с использованием аналитического комплекса на базе газового хроматографа Хромос GX-1000 и программных продуктов Хромос™, FlowPlot™, FlowView™, FlowTune™.

Личный вклад соискателя состоит в: заключается в непосредственном формулировании цели и задачи работы, выбирал методы 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, разработке математической модели, формулировании выводов и положений и подготовке публикаций.

На заседании диссертационного совета РХТУ.05.02 РХТУ 26 . 11 . 2020 г. принято решение о присуждении ученой степени кандидата технических наук Атласкину Артему Анатольевичу.

Присутствовало на заседании 14 членов диссертационного совета,

в том числе докторов наук по научной специальности, отрасли науки рассматриваемой диссертации -6 человек,

в том числе в режиме видеоконференции -5.

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

«за» 12,

«против» 0,

«воздержались» 2.

Председатель диссертационного совета

Ученый секретарь диссертационного совета

Дата «26» ноября 2020 г.



Проф. Колесников В.А.

Сондратьева Е.С.