

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу

**АТЛАСКИНА Артема Анатольевича**

на тему: «Разделение газовых смесей в мембранном каскаде типа «Непрерывная мембранная колонна», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.17.18 – Мембраны и мембранная технология (технические науки)

**Актуальность работы.** Развитие технологии мембранного разделения газовых смесей представляет собой актуальную задачу современной химической отрасли с точки зрения оптимизации существующих и создания новых производств из-за отличительных особенностей такого подхода, заключающихся в низкой энергоемкости, возможности проведения процесса при температуре окружающей среды, простоте аппаратного оформления и модульной структуре установок. Учитывая сложившуюся в мире экономическую и экологическую ситуацию, метод мембранного газоразделения выгодно отличается от традиционно-применяемых подходов, основанных на сорбции, дистилляции и кристаллизации. Одним из направлений развития мембранной технологии является создание новых мембранных аппаратов и разработка новых технологий, направленных на улучшение характеристик процесса. Поэтому, рецензируемая диссертационная работа Атласкина А.А., посвященная экспериментальному и теоретическому изучению особенностей функционирования мембранного каскада типа «Непрерывная мембранная колонна» при разделении газовых смесей, определенно, является актуальной.

**Общая характеристика работы.** Диссертация Атласкина А.А. направлена на экспериментальное и теоретическое изучение особенностей функционирования мембранного каскада типа «Непрерывная мембранная колонна» в ходе реализации принципиально разных разделительных задач: глубокая очистка газов (разделение разбавленных газовых смесей) и выделение диоксида углерода из дымовых газов ТЭЦ (разделение смеси с сопоставимыми концентрациями компонентов). В рамках этого исследования была разработана математическая модель массообмена в мембранном каскаде, а также выполнена ее верификация с помощью экспериментально определенных зависимостей типа эффективность разделения / производительность каскада полученных для различных модельных и квази-реальной газовых смесей. Кроме того, были выявлены особенности функционирования каскада в различных режимах работы (безотборный и близкий к безотборному) и определены возможности интенсификации разделительного процесса за счет реализации процесса в нестационарных условиях, а также была определена динамика установления стационарного состояния в различных режимах работы. Также, с использованием разработанной и верифицированной модели была рассчитана промышленная технологическая схема мембранного каскада для выделения диоксида углерода из дымовых газов ТЭЦ.

**Научная новизна.** В рамках диссертационной работы была создана математическая модель массообмена в мембранном каскаде, позволяющая осуществлять расчет разделительного процесса. Эта модель справедлива как для мембранных модулей, работающих в режиме поперечного тока, так и для режима противотока. Были экспериментально получены новые

данные о функционировании различных технологических схем мембранного каскада в безотборном и близком к безотборному режимам работы. Впервые экспериментально определено влияние селективности используемой мембраны на эффективность глубокой очистки газов в трехмодульной конфигурации мембранного каскада. Выявлены возможности интенсификации процесса глубокой очистки при реализации разделительного процесса в нестационарных условиях работы каскада. Также, предложена новая технологическая схема для выделения диоксида углерода из дымовых газов ТЭЦ, выполнен ее расчет и проведено технико-экономическое обоснование.

**Практическая значимость работы.** Полученные в рамках диссертационной работы результаты имеют ценность с точки зрения разработки и создания новых мембранных газоразделительных аппаратов. Разработанная математическая модель, адекватность результатов которой подтверждена экспериментально, позволяет производить расчет различных технологических схем мембранных каскадов. Экспериментально полученные результаты демонстрируют перспективность применения мембранного каскада типа «Непрерывная мембранная колонна» для задач глубокой очистки газов до уровня 99.999995 об.% целевого компонента, а рассчитанная технологическая схема может быть применена для выделения диоксида углерода из дымовых газов ТЭЦ.

**Достоверность результатов и выводов.** Достоверность данных, полученных Атласкиным А.А. обоснована применением современного аналитического оборудования. Представленные в диссертационной работе результаты воспроизводимы. Кроме того, они не противоречат друг другу и представленным в литературе данным. Подход к получению результатов является системным, а выводы, сделанные на основании полученных результатов, представляются логичными, обоснованными, не противоречащими и соответствующими цели исследования.

**Содержание.** Диссертация Атласкина А.А. состоит из введения, пяти глав основного текста (обзора литературы, экспериментальной части, описания математической модели, результатов и их обсуждения, расчета технологической схемы) заключения, списка публикаций по теме диссертационной работы и списка цитирований из 129 источников. Диссертация изложена на 186 страницах и включает в себя 24 таблицы и 92 рисунка.

Во **введении** обоснована актуальность выбранной темы диссертационной работы и сформулирована ее цель, определены задачи, которые было необходимо решить в рамках исследования. В полной мере отражена научная новизна и практическая значимость диссертационной работы.

В **первой главе** рассмотрены и систематизированы литературные данные о многостадийных мембранных системах, применяемых для различных задач переработки газовых сред. Рассмотрены особенности их функционирования. В рамках этой главы обоснован выбор объекта исследования – мембранного каскада типа «Непрерывная мембранная колонна».

Во **второй главе** представлены объекты исследования, приведено исчерпывающее описание экспериментальных подходов и используемого оборудования. В том числе детально описаны инженеринговые аспекты изучения функционирования каскада в безотборном режиме работы и при реализации разделительного процесса в нестационарных условиях.

В **третьей главе** описана математическая модель массообмена, разработанная для двух режимов работы мембранного модуля: поперечный ток и противоток. Так же модель учитывает предельные случаи процесса: идеальное вытеснение и полное перемешивание.

В **четвертой главе** приведены полученные в рамках работы результаты и выполнено их обсуждение. Первым этапом работы было определение закономерностей функционирования мембранного каскада типа «Непрерывная мембранная колонна» в безотборном и близком к безотборному режимам работы, в рамках которого была определена динамика установления стационарного состояния и изучено взаимное влияние секций каскада при разделении разбавленных смесей. Далее было выполнено определение зависимости эффективности глубокой очистки от производительности каскада, а также было выявлено влияние селективности (от 2.5 до 94.3) используемой мембраны на эффективность процесса. В ходе этого этапа оценивались двух- и трехмодульная конфигурации каскада, а их результаты были сравнены с оригинальной непрерывной мембранной колонной. Было показано, что существует возможность получения продукта чистотой 99.999995 об.%.

Во второй части главы было выполнено экспериментальное определение эффективности выделения диоксида углерода из дымовых газов ТЭЦ в трехмодульной конфигурации мембранного каскада на примере разделения тройной газовой смеси. В рамках этого эксперимента было изучено взаимное влияние секций извлечения и обогащения каскада, а также определены предельные разделительные возможности такой технологической схемы. Полученные экспериментальные данные для разделения разбавленных газовых смесей и смеси с сопоставимыми концентрациями компонентов позволили верифицировать разработанную математическую модель.

Далее изучалась влияние проведения процесса в нестационарных условиях (за счет реализации импульсного отбора целевого компонента из секции извлечения или секции обогащения каскада) на эффективность разделения газовых смесей. Были определены особенности функционирования мембранного каскада от ряда технологических параметров, а именно, от величины и соотношения потоков отбора, их объемов и скоростей, продолжительности циклов чередующихся отборов и безотборных периодов. Сравнение стационарного и нестационарного вариантов проведения процесса продемонстрировало преимущество импульсного отбора из секции извлечения, заключающееся в более эффективной глубокой очистке при сохранении производительности. Наиболее выраженным эффектом был в области малых производительностей.

В **пятой главе** диссертационной работы приведены технологическая схема мембранного каскада для выделения диоксида углерода из дымовых газов ТЭЦ и результаты ее расчета. В этой части работы анализировалось влияние технологических параметров на содержание диоксида углерода в потоке, отбираемым в качестве продукта, и его остаточное содержание в сбросном потоке газа. По результатам такого анализа были определены диапазоны значений технологических параметров, доступные для оптимизации. В результате была предложена промышленная технологическая схема, разработанная на базе трехмодульной конфигурации мембранного каскада типа «Непрерывная мембранная колонна», обеспечивающая выделение диоксида углерода чистотой более 97 мол.% при степени выделения более 93 %. Заключительным этапом диссертационной работы был технико-экономический анализ, по результатам которого была определена себестоимость выделения тонны диоксида углерода - 2455 Р (31 \$).

В **заключении** работы автор приводит основные результаты и формулирует ключевые выводы из проделанной работы.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертации были представлены на 11 научных конференциях всероссийского и международного уровня. По материалам работы опубликованы 4 статьи в квалифицированных журналах. Автореферат диссертации и опубликованные научные работы в полной мере отражают содержание диссертации.

Диссертационная работа написана логично, грамотным языком, содержит большой экспериментальный материал. Однако, после прочтения диссертационной работы Атласкина А.А. у оппонента возникли ряд вопросов и замечаний, а именно:

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.

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

Диссертация Атласкина А.А. на тему «Разделение газовых смесей в мембранном каскаде типа «Непрерывная мембранная колонна», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук, является законченной квалификационной работой, по содержанию, форме и актуальности поставленных и решенных задач, совокупности новых научных результатов, в достаточной степени аргументированных, отвечает требованиям к кандидатским диссертациям выдвинутым в положении «О порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842 (в действующей редакции), а ее автор заслуживает присвоения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.17.18 Мембраны и мембранная технология.

Диссертационная работа в полной мере соответствует паспорту специальности 05.17.18 Мембраны и мембранная технология по следующим пунктам:

п.4 - Технологические схемы с применением мембранных процессов, их экономическое и экологическое обоснование;

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 компонентов из сточных вод и газовых выбросов, использование процессов и устройств для поддержания жизнедеятельности человека;

п.7 - Методы расчета и оптимизация режимов работы мембранных аппаратов и систем с целью улучшения конструкции аппаратов и повышения эффективности их работы. Изучение особенностей мембранных систем, таких как концентрационная поляризация, и методов борьбы с этим явлением.

Официальный оппонент

доктор технических наук (05.17.18 Мембраны и мембранные технологии), профессор, заведующий кафедрой мембранной технологии федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева»

Каграманов Георгий Гайкович

« 09 » ноября 2020 г.

125047, г. Москва, Миусская пл., д. 9.

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

Телефон: +7 (499) 978 82 60

E-mail: [kadri@mucrt.ru](mailto:kadri@mucrt.ru)

*Г.Г. Каграманов*



*(И.К. Каминин)*