

## **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)

### **Общая характеристика работы**

Диссертационная работа Атласкина А.А. посвящена изучению функционирования мембранного каскада типа «Непрерывная мембранная колонна», применительно к задачам глубокой очистки газов (разделение разбавленных смесей) и при выделении диоксида углерода из дымовых газов ТЭЦ (разделение газовой смеси с сопоставимыми концентрациями компонентов). В рамках работы были установлены зависимости типа эффективность разделения / производительность каскада, а также были определены предельные разделительные возможности каскада. В работе были установлены закономерности функционирования различных схем мембранного каскада в безотборном и близком к безотборному режимам работы, и была выполнена оценка возможности интенсификации разделения газовых смесей при проведении процесса в нестационарных условиях. Более того, была разработана и верифицирована математическая модель массообмена в мембранном каскаде. С помощью этой модели был выполнен расчет технологической схемы для выделения диоксида углерода из дымовых газов ТЭЦ.

### **Актуальность работы**

В современном экономическом и экологическом контексте поиск новых и оптимизация существующих технологий переработки газов является актуальной задачей. В качестве альтернативы традиционным энергоемким подходам, основанным на сорбции, дистилляции и кристаллизации, может быть рассмотрена технология мембранного газоразделения, характеризующаяся сравнительно низким энергопотреблением, возможностью проведения процесса при комнатной температуре и в отсутствие фазовых переходов. При этом развитие мембранной технологии может осуществляться через поиск и создание новых мембранных материалов, а также путем создания новых технологических схем и инжиниринговых решений. Именно последнему подходу и посвящена диссертационная работа Атласкина Артема Анатольевича.

Таким образом, диссертационная работа Атласкина А.А., которая посвящена комплексному изучению функционирования мембранного каскада типа «Непрерывная мембранная колонна» при разделении газовых смесей, несомненно, является актуальной.

### **Научная новизна**

В рамках диссертационной работы были получены новые экспериментальные данные о функционировании мембранного каскада типа «Непрерывная мембранная колонна» в различных режимах работы, включая безотборный и близкий к безотборному режимы работы. Была разработана математическая модель массообмена в мембранном каскаде, описывающая изменение состава газовой смеси в зависимости от газотранспортных характеристик мембраны (проницаемость, селективность) и параметров процесса (перепад давления, доля отбора) и адекватная задачам расчета разделения как

разбавленных газовых смесей, так и смесей с сопоставимыми концентрациями компонентов.

### **Практическая значимость работы**

Полученные результаты имеют практическую ценность с точки зрения разработки новых и оптимизации существующих мембранных газоразделительных аппаратов, применяемых в области глубокой очистки газов и для выделения диоксида углерода из дымовых газов ТЭЦ. Разработанная и экспериментально верифицированная математическая модель массообмена позволяет производить расчет технологических схем мембранного каскада. Экспериментально полученные результаты демонстрируют перспективность применения трехмодульной конфигурации мембранного каскада в задачах глубокой очистки газов вплоть до остаточного содержания примесного компонента на уровне  $5 \cdot 10^{-6}$  об.%. Рассчитанная и оптимизированная технологическая схема для выделения диоксида углерода из дымовых газов ТЭЦ позволяет получать продукт чистотой более 97 мол.% при степени его выделения более 93 %.

### **Достоверность результатов и выводов**

Достоверность полученных результатов не вызывает сомнений, так как работа выполнена с использованием современного аналитического оборудования. Результаты являются воспроизводимыми и не противоречат друг другу и известным сведениям. Выводы, сформулированные на основании полученных данных, не противоречат им и полностью соответствуют цели исследования.

### **Содержание**

Диссертационная работа Атласкина А.А. состоит из введения, 5 глав, заключения, списка публикаций по теме диссертационной работы и списка литературы, содержащего 129 наименований. Основное содержание работы изложено на 186 страницах машинописного текста и содержит 92 рисунка и 24 таблицы.

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель диссертационной работы и приведены задачи, которые были решены в ходе работы. Полностью отражена научная новизна и практическая значимость работы. Обоснована надежность и достоверность полученных результатов, а также личный вклад автора в диссертационную работу.

В **первой главе** рассмотрено применение различных конфигураций многостадийных мембранных разделительных аппаратов в ряде областей химической промышленности. Выполнен анализ особенностей их функционирования. В тексте обоснован выбор мембранного каскада типа «Непрерывная мембранная колонна» в качестве объекта исследования. Диссертантом систематизирован большой массив опубликованных данных по конфигурациям многостадийных мембранных аппаратов.

Во **второй главе** представлено детальное описание экспериментальных установок и процедур, в том числе приведено описание оригинальных подходов к изучению безотборного режима работы мембранного каскада и определению закономерностей его функционирования в нестационарных условиях проведения процесса.

В **третьей главе** приведено описание разработанной математической модели массообмена. При этом, в работе приводится математическая модель для двух типов организации потоков в мембранном модуле: поперечный ток и противоток. Более того,

рассмотрены предельные случаи газоразделительного процесса (идеальное вытеснение и полное перемешивание).

В четвертой главе представлены и обсуждены результаты изучения функционирования различных конфигураций мембранного каскада в безотборном и близком к безотборному режимам работы. На основании полученных результатов определены оптимальные условия проведения разделительного процесса при реализации глубокой очистки газов. Далее была выполнена экспериментальная оценка эффективности глубокой очистки газов в двух- и трехмодульной конфигурациях мембранного каскада, а также было выполнено сравнение с непрерывной мембранной колонной. Кроме того, изучалось влияние селективности используемой мембраны (в диапазоне от 2.5 до 94.3) на эффективность глубокой очистки. Была продемонстрирована возможность достижения чистоты целевого компонента 99.999995 об.%. На основании экспериментально определенных зависимостей была выполнена верификация разработанной математической модели для процесса разделения разбавленных газовых смесей.

В следующей части этого раздела экспериментально изучались особенности функционирования секций извлечения и обогащения мембранного каскада при разделении тройной газовой смеси близкой по составу к дымовым газам ТЭЦ. Было определено, что для достижения высокой чистоты процесс следует проводить при низких значениях доли отбора из секции обогащения. На основании определенных зависимостей была верифицирована математическая модель для процесса разделения газовых смесей с сопоставимыми концентрациями компонентов.

Далее было выполнено экспериментальное определение возможности интенсификации разделения газовых смесей путем проведения процесса в нестационарных условиях работы мембранного каскада. Были 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 эффективной селективностью от 2 до 78. Было проведено сравнение эффективности разделения газовых смесей со стационарным вариантом проведения процесса. В рамках этого эксперимента было продемонстрировано, что эффективность разделения в нестационарном режиме работы секции извлечения превосходит эффективность стационарного режима работы во всем рассмотренном диапазоне производительностей.

В пятой главе диссертационной работы выполнен расчет промышленной технологической схемы мембранного каскада типа «Непрерывная мембранная колонна» для выделения диоксида углерода из дымовых газов ТЭЦ. В рамках этого раздела выполнен анализ влияния технологических параметров (селективность мембраны, площадь мембраны в секциях аппарата) на чистоту выделяемого продукта и степень его извлечения. На основании полученных зависимостей выполнена оптимизация технологической схемы. Заключительным этапом работы является технико-экономический анализ предложенной технологической схемы, результатом которого является оценка себестоимости выделения тонны диоксида углерода, которая составила 2455 Р (31 \$).

В заключении диссертационной работы автор подводит итоги проделанной работы.

Работа прошла необходимую апробацию. Результаты были представлены на 11 всероссийских и международных конференциях. По материалам диссертации

опубликованы 4 статьи в квалифицированных журналах. Автореферат диссертации и опубликованные работы полностью отражают основное содержание работы.

Автор диссертации провел большую научную работу, включающую как определение целей и задач, анализ литературных данных, а также весь объем экспериментальных и теоретических исследований и интерпретации полученных результатов, тем самым проявив себя как высококвалифицированный исследователь. Результаты работы, несомненно, имеют большое значение для развития мембранной технологии как с фундаментальной, так и с прикладной точки зрения.

При прочтении диссертации возникает ряд вопросов и замечаний, ответы на которые могут иметь достаточно важное значение:

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  $\text{CO}_2$  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. Автором отмечается, 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  $\text{CO}_2$ . В связи с этим возникает вопрос о влиянии проницаемости мембраны на ключевые характеристики процесса.

Замечания к работе не имеют принципиального характера и не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы. Представленная Атласкиным А.А. работа является актуальной по теме, законченной по характеру исследований в рамках

поставленных задач и выполненной на высоком уровне. Экспериментальный материал получен с помощью современного аналитического оборудования и является достоверным и оригинальным. Подходы к исследованию хорошо продуманы. Интерпретация результатов выполнена на основе современных научных представлений в области исследования мембранных процессов.

Диссертационная работа Атласкина Артема Анатольевича на тему «Разделение газовых смесей в мембранном каскаде типа «Непрерывная мембранная колонна» по объему, актуальности, научной новизне и практической значимости удовлетворяет требованиям к кандидатским диссертациям 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.

Работа полностью соответствует паспорту специальности 05.17.18 Мембраны и мембранные технологии (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 химических наук (05.17.18 Мембраны и мембранные технологии), доцент кафедры аналитической химии института химии федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет»

Пенькова Анастасия Владимировна \_\_\_\_\_

« 18 » октября 2020 г.

198504, г. Санкт-Петербург, Петергоф, Университетский пр-т., д. 26

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет»

Телефон: +7 (951) 664 67 47

E-mail: [a.penkova@spbu.ru](mailto:a.penkova@spbu.ru)

Документ подготовлен  
в порядке исполнения  
трудовых обязанностей

Личное дело  
д. о. начальник

3  
Руденко,  
20