

## УТВЕРЖДАЮ:

Директор по научной работе

Журкин Андрей Александрович

14 сентября 2020 г.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева»

Диссертационная работа Атласкина Артема Анатольевича «Разделение газовых смесей в мембранном каскаде типа «Непрерывная мембранная колонна» выполнена на кафедре «Нанотехнологии и биотехнологии» Института физико-химических технологий и материаловедения.

В период подготовки диссертации соискатель Атласкин А.А. обучался в очной аспирантуре федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», работал в должности инженера кафедры «Нанотехнологии и биотехнологии» Института физико-химических технологий и материаловедения Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева.

В 2016 году окончил магистратуру федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева» по направлению «Электроника и наноэлектроника».

Научный руководитель:

Воротынцев Илья Владимирович, доктор технических наук, профессор федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», профессор кафедры «Нанотехнологии и биотехнологии».

## **Оценка выполненной соискателем работы**

Диссертационная работа посвящена комплексному изучению процесса разделения газовых смесей в мембранном каскаде типа «Непрерывная мембранная колонна» при работе в безотборном, близком к безотборному, стационарном и нестационарном режимах в задачах глубокой очистки труднопроникающего компонента и выделения диоксида углерода из дымовых газов ТЭЦ.

В настоящее время в сфере разделения и очистки газов сформировалась тенденция к разработке новых или оптимизации существующих технологий. При этом сложившаяся в мире экологическая ситуация подталкивает исследователей и инженеров к преодолению проблемы высокой нагрузки на окружающую среду. Поэтому разрабатываемые технологические решения должны быть сосредоточены не только на повышении эффективности и производительности, но и характеризоваться энергоэффективностью и соответствовать принципам «зеленой» химии. С учетом отмеченных выше критериев, метод мембранного газоразделения может быть рассмотрен в качестве компромиссного решения так как процесс реализуется под действием градиента давления в отсутствие фазовых переходов, а мембранные аппараты характеризуются простотой аппаратурного оформления и малыми габаритами.

Одним из подходов к разделению газовых смесей является использование многоступенчатых мембранных каскадов, где повышение степени очистки продукта достигается за счет увеличения числа разделительных ступеней. Однако такие аппараты не нашли широкого применения в связи с тем, что их конструкция требует сжатия потока на каждом последующем этапе, что влечет за собой увеличение капитальных затрат на такие устройства, и более того, большое количество ступеней и компрессоров, сложность конструкции оборудования и наличие "мертвых зон" внутри устройства, могут привести к нежелательному загрязнению целевого компонента.

Концепция мембранного каскада типа «Непрерывная мембранная колонна» может быть рассмотрена в качестве альтернативы как традиционным энергоемким методам (основанным на дистилляции или абсорбции), так и многоступенчатым мембранным каскадам. Разделение в такой конфигурации аппарата происходит в непрерывном режиме, образуя два противоточных контура, один из которых обеднен легкопроникающим компонентом, в то время как второй содержит его концентрат. При этом конфигурация ограничивается тремя мембранными модулями (одним в секции извлечения и двумя в секции обогащения) и одним вакуум-компрессором.

Для непосредственной оценки эффективности мембранного каскада типа «Непрерывная мембранная колонна» в задачах газоразделения требуется проведение

комплексного, как экспериментального, так и теоретического изучения аппарата в различных режимах работы (безотборный, близкий к безотборному, стационарный нестационарный) и при решении принципиально разных задач (глубокая очистка труднопроникающего компонента и выделение диоксида углерода из дымовых газов ТЭЦ). Кроме того, с целью прогнозирования эффективности устройства, а также, определения потенциала промышленного использования необходима разработка математической модели массообмена в этом мембранном аппарате.

В свете вышеизложенного, тема диссертационной работы Атласкина А.А. является актуальной.

Проведенное Атласкиным А.А. экспериментальное изучение мембранного каскада типа «Непрерывная мембранная колонна», включающее в себя рассмотрение поведения аппарата в безотборном и близком к безотборному режимам, оценка эффективности глубокой очистки газов и определение вклада селективности используемой мембраны в степень очистки, экспериментальный анализ работы секций извлечения и обогащения при выделении (концентрировании) диоксида углерода из тройной газовой системы, экспериментальное изучение влияния проведения процесса в нестационарном режиме работы на эффективность очистки труднопроникающего компонента и концентрирования легкопроникающих компонентов смеси, а так же разработка математической модели массообмена в каскаде, ее экспериментальная верификация и последующий расчет промышленной технологической схемы мембранного аппарата для задачи выделения диоксида углерода из дымовых газов ТЭЦ позволяют дать высокую оценку выполненной работе в целом.

**Личное участие соискателя в работе** заключается в формулировании и обосновании целей и задач, выборе методов исследования, проведения анализа и обработке полученных результатов. Атласкин А.А. 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.

**Достоверность представленных в работе результатов и обоснованность выводов обеспечиваются** 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.

### **Научная новизна работы:**

Экспериментально изучено поведение аппарата в безотборном и близком к безотборному режимам работы. Определены оптимальные условия проведения процесса для задачи глубокой очистки труднопроникающего компонента.

Экспериментально определена эффективность глубокой очистки труднопроникающего компонента в различных конфигурациях аппарата на примере разделения трех модельных газовых смесей.

Определено влияние селективности используемой мембраны на эффективность глубокой очистки газов. Выполнено непосредственное экспериментальное сравнение эффективности мембранного каскада с непрерывной мембранной колонной.

Выполнен анализ работы секций извлечения и обогащения мембранного каскада при выделении диоксида углерода из тройной газовой смеси, имитирующей дымовые газы ТЭЦ. Экспериментально оценена эффективность концентрирования диоксида углерода.

Экспериментально определено влияние проведения процесса разделения в нестационарных условиях на эффективность глубокой очистки труднопроникающего компонента и концентрирования легкопроникающего компонента в различных конфигурациях мембранного каскада.

Разработана математическая модель массообмена в мембранном каскаде как для задач разделения разбавленных газовых смесей, так и для смесей со сравнимыми концентрациями компонентов. Выполнена экспериментальная верификация разработанной математической модели.

Выполнен расчет промышленной технологической схемы мембранного каскада типа «Непрерывная мембранная колонна» для задачи выделения диоксида углерода из дымовых газов ТЭЦ.

### **Практическая значимость работы**

Результаты диссертационной работы Атласкина А.А. имеют высокую практическую значимость для разработки новых и оптимизации существующих мембранных газоразделительных аппаратов, применяемых как в сфере глубокой очистки труднопроникающих компонентов, так и при решении задач концентрирования легкопроникающих компонентов газовых смесей. Экспериментально полученные зависимости демонстрируют особенности проведения газоразделительного процесса. Разработанная, экспериментально верифицированная на примере двух принципиально разных задач, математическая модель массообмена позволяет производить расчет технологических схем мембранного каскада типа «Непрерывная мембранная колонна» с учетом масштабирования до промышленного уровня.

**Ценность научных работ соискателя заключается в установлении закономерностей между эффективностью разделения газовых смесей и производительностью аппарата, изучении поведения аппарата в безотборном и близком к безотборному режимам работы, определении предельных разделительных возможностей аппарата при глубокой очистке труднопроникающего компонента и концентрировании легкопроникающего компонента.**

**Основное содержание диссертации опубликовано в 15 научных работах, среди которых 2 статьи в журнале, рекомендованном ВАК Российской Федерации, 2 статьи в международном журнале, индексируемом в аналитических системах цитирования Web of Science и Scopus, и 11 тезисов докладов для российских и международных научных конференций.**

Основные публикации:

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.

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<sub>2</sub> // Мембраны и Мембранные Технологии. 2020. Т. 10. № 1. С. 42-53.

3. **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. V. 572. P. 92-101.

4. **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. V.587. P. 117173.

Диссертационная работа Атласкина А.А. «Разделение газовых смесей в мембранном каскаде типа «непрерывная мембранная колонна» **соответствует паспорту специальности 05.17.18 «Мембраны и мембранная технология» в части области исследований:**

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.

Диссертация «Разделение газовых смесей в мембранном каскаде типа «Непрерывная мембранная колонна» Атласкина Артема Анатольевича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.17.18 «Мембраны и мембранная технология» (технические науки).

Заключение принято на расширенном заседании кафедры «Нанотехнологии и биотехнологии». Присутствовало на заседании – 16 человек. Результаты голосования: «за» – 16 человек, «против» – нет, «воздержалось» – нет, протокол № 3 от 14 сентября 2020 года.



Воротынцев Владимир Михайлович  
доктор химических наук, профессор,  
заведующий кафедрой «Нанотехнологии  
и биотехнологии»