

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Анисимовой Марии Александровны «Математическое моделирование процессов разделения смеси азота и кислорода с помощью селективной мембраны», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы

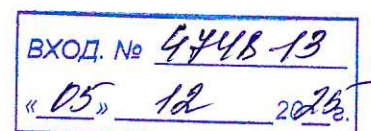
Актуальность темы диссертационной работы. Разработка энергоэффективных и компактных методов разделения газовых смесей является одной из ключевых задач современной химической технологии и энергетики. Мембранная технология, основанная на использовании селективных пористых мембран, занимает лидирующие позиции в этой области благодаря длительному ресурсу работы, низкому энергопотреблению и экологической безопасности. Однако повышение эффективности мембранного разделения требует углубленного изучения физических процессов, протекающих в мембранных модулях, и разработки адекватных математических моделей, учитывающих комплексный характер массопереноса. Существующие подходы к моделированию либо ограничиваются статическими приближениями, либо не учитывают в полной мере взаимовлияние потоков внутри и снаружи мембраны. В связи с этим разработка новых физико-математических моделей, интегрирующих динамику продольного переноса и поперечной фильтрации, представляет собой актуальную научную проблему.

Диссертационная работа Анисимовой М.А. направлена на решение этой проблемы путем создания математической модели, описывающей процесс разделения газовой смеси в пористой мембране.

Целью работы является исследование процессов массопереноса компонентов газовой смеси при фильтрации в селективной мембране на основе модельных аналитических и численных решений.

Научная новизна диссертационного исследования заключается в следующем:

1. Разработана физико-математическая модель процесса разделения газовой смеси в пористой селективной мембране, учитывающая совместно продольный массоперенос во входном и выходном потоках и поперечную фильтрацию через мембрану.
2. Получены безразмерные комплексы подобия, позволяющие оценить влияние продольного переноса на эффективность разделения и провести упрощение исходной системы уравнений.
3. Выявлен критерий, определяющий режим разделения (с преобладанием фильтрации или диффузии) в зависимости от соотношения градиента давления и градиента концентрации.



4. Получено аналитическое решение для упрощенной задачи в случае пренебрежения продольным переносом, позволяющее определить коэффициент селективности мембраны.

Достоверность исследований обеспечивается корректным использованием фундаментальных уравнений механики сплошных сред, применением апробированных методов численного моделирования, а также валидацией разработанных моделей путем сравнения с литературными данными и результатами экспериментов.

Научная и практическая значимость работы состоит в установлении зависимостей между ключевыми параметрами мембранного процесса (проницаемостью, селективностью, давлением) и выходными характеристиками (чистотой получаемых газов, временем выхода на стационарный режим). Предложенные модели и аналитические решения могут быть использованы для проектирования и оптимизации промышленных мембранных установок разделения воздуха.

Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы, содержит 26 рисунков и 2 таблицы. Общий объем диссертации – 102 страницы. Список литературы состоит из 142 источников, в том числе 111 источников из зарубежной литературы.

Первая глава диссертации посвящена литературному обзору существующих работ в исследуемой области. Были рассмотрены основные виды мембран и способы их изготовления.

Также описана технология мембранного разделения и экспериментальные исследования, которые расширяют возможности мембраны стать конкурирующей технологией в области газоразделения. Рассмотрены существующие подходы к моделированию процессов разделения газов в мембранных установках.

На основании анализа современного состояния исследований сделан вывод, что в настоящее время не было получено одномерной физико-математической модели с учетом продольного массопереноса.

Вторая глава посвящена описанию физико-математической модели процесса разделения газовых компонентов с учетом продольного массопереноса на основании уравнений сохранения массы и импульсов, а также замыкающих уравнений для потока компонентов газа. Проведено обезразмеривание системы уравнений, позволившее выделить безразмерные комплексы подобия (A_1, A_2, A_3, A_4).

На основании использования разработанной автором физико-математической модели была получена зависимость времени выхода концентрации отбираемого азота на стационарные значения. Показано, что увеличение проницаемости мембраны приводит к сокращению времени выхода на стационарный режим, что может сказаться на чистоте отбираемого потока.

В третьей главе описывается физический смысл безразмерных комплексов и проводится анализ влияния комплексов подобия, который показывает, что коэффициенты перед слагаемыми в физико-математической

модели имеют несопоставимые значения и систему уравнений можно упростить.

На основании полученной физико-математической модели были получены распределения концентрации азота внутри и вне волокна мембраны от координаты, которые отличаются различными эффектами при разделении: когда преобладает фильтрация и когда преобладает диффузия.

Особый научный интерес представляет разработанный автором критерий K_{eff} , который количественно определяет границу перехода между режимами с преобладанием фильтрации и диффузии. Данный критерий имеет четкую физическую интерпретацию как отношение движущих сил диффузионного и конвективного переноса, что позволяет не только классифицировать режимы работы мембранной установки, но и целенаправленно управлять процессом разделения путем регулирования технологических параметров.

Валидация разработанных математических моделей выполнена путем сравнения с экспериментом из статьи о мембранной установке, где давление являлось доминирующим фактором, вносящим наибольший вклад в повышение чистоты целевого продукта.

В четвертой главе описана физико-математическая модель процесса фильтрационного разделения смеси газов на компоненты мембраной в пренебрежении продольным переносом массы.

В работе рассмотрена экспериментальная установка для определения коэффициента проводимости мембраны. Из-за различных значений давлений по обе стороны мембраны происходит деление газов на отдельные компоненты с отличными друг от друга коэффициентами проводимости.

Предложена интерпретация экспериментальных данных для определения коэффициентов проводимости азота и кислорода, основанные только на анализе динамики выравнивания давления в ячейках, разделенных мембраной. Ключевым преимуществом предложенного подхода является возможность определения транспортных характеристик мембраны без использования сложной аналитической аппаратуры для измерения концентраций газов.

Замечания по диссертации:

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 $K_{\text{эф}}$ 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.

Заключение

Диссертационная работа Анисимовой Марии Александровны представляет собой законченное научное исследование, в котором решена актуальная задача разработки математических моделей процессов мембранного разделения газов. Автор демонстрирует глубокие знания в области механики жидкости и газа, а также владение современными методами математического моделирования. Автореферат и опубликованные работы полностью отражают содержание диссертации, работа соответствует пунктам 8, 19, 20 паспорта специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы. Таким образом, диссертационная работа Марии Александровны Анисимовой «Математическое моделирование процессов разделения смеси азота и кислорода с помощью селективной мембраны» полностью удовлетворяет требованиям пунктов 9-14 Положения о присуждении ученых степеней (утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842 в действующей редакции), а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по научной специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы.

Согласен на обработку моих персональных данных, размещение персональных данных и моего отзыва на диссертацию на сайте ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» и в Федеральной информационной системе государственной научной аттестации (ФИС ГНА).

Официальный оппонент:

кандидат физико-математических наук по научной специальности: 1.3.14 -- Теплофизика и теоретическая теплотехника, научный сотрудник лаборатории гидродинамики многофазных сред Тюменского филиала Федерального государственного бюджетного учреждения Института и прикладной механики им. С.А.



Бельских Денис
Сергеевич

Христиановича Сибирского отделения Российской
академии наук.

«25» ноября 2025 г.

Тюменский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения
Института и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского
отделения Российской академии наук, г. Тюмень, ул. Таймырская, а/я 1507,
ТюмФ ИТПМ СО РАН.

Телефон: +7(3452)68-27-45(доб. 109); E-mail: denisbelskih@mail.ru

Подпись Бельских Дениса Сергеевича удостоверяю:

сверский специалист по кадрам *Дн*

Караульных М.М.

