

## УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе ФГБОУ  
ВО «Казанский национальный  
исследовательский технологический  
университет», доктор технических наук,  
профессор

А.Н. Сабирзянов

«17»

2018г.



## ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу Борисевич Ольги Борисовны «Разработка процесса разделения смесей водород – гелий в присутствии паров воды цеолитными мембранами», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.17.18. - Мембраны и мембранная технология (технические науки)

### Актуальность работы

В настоящее время, постоянный рост мирового потребления энергии базируется, в основном, на ископаемых видах топлива, запасы которых непрерывно уменьшаются. Кроме того, технологии получения энергии из углеводородов сопровождаются выбросами  $CO_2$  и тем самым способствуют негативному изменению климата. Перспективным решением энергетической проблемы и вопросов климата является использование энергии термоядерного синтеза. Термоядерные реакции дейтерия представляют особый интерес в связи с его неограниченными природными запасами. Наиболее перспективным процессом с целью получения энергии является взаимодействие между дейтерием и тритием. В этой области ведутся многолетние последовательные исследования с целью создания замкнутой технологии. Рассматриваемая диссертация посвящена разработке одной из важных стадий такой технологии, которая связана с выделением, концентрированием и доставкой(возвратом) изотопов водорода в зону реакции, что делает эту работу весьма актуальной. Работа Борисевич О.Б. выполнена в рамках концепции совмещения процессов, включающей извлечение целевого компонента в каталитическом мембранном реакторе ПЕРМКАТ с предварительным

концентрированием с помощью цеолитных мембран на примере смеси водород/гелий в присутствии паров воды. В связи с этим целью работы является экспериментальное определение характеристик разделения водород/гелий на полволоконных и трубчатых цеолитных мембранах и расчет мембранного каскада на их основе для разделения смесей водород-гелий, в том числе, в присутствии паров воды.

### **Основное содержание работы**

Диссертация состоит из введения, четырех основных глав и заключения. Материал диссертации изложен на 173 страницах (включая Приложение), содержит 81 рисунок, 39 таблиц. Список цитируемой литературы включает 136 наименований.

Во **введении диссертации** сформулированы актуальность, цели работы, научная новизна и практическая значимость, дан анализ достоверности результатов и личного вклада автора.

**В первой главе представлен** литературный обзор, где достаточно подробно с необходимыми ссылками сформулированы основные принципы функционирования ИТЭР (первой, разрабатываемой в рамках международного сотрудничества, электростанции с термоядерным реактором, содержащим замкнутый топливный цикл) и мощного источника энергии (проект ДЕМО), предназначенного для непрерывной работы. Отмечено, что во всех существующих технологиях изотопы водорода удаляются после реакции большими потоками гелия, приводя к смесям гелия с малыми примесями изотопов водорода. Кратко рассмотрены системы выделения трития для термоядерного реактора и существующие концепции таких систем, одну из которых представляет ПЕРМКАТ с предварительным мембранным концентрированием. В обзоре литературы проведен сравнительный анализ опубликованных разделительных и структурных свойств таких мембран на основе металлов, полимеров, неорганических протон-проводящих материалов и цеолитных мембран. В выводах к обзору литературы диссертантом сформулировано, что для процессов предконцентрирования изотопов водорода могут быть перспективными цеолитные мембраны.

**Вторая глава** диссертационной работы Борисевич О.Б. посвящена экспериментальному и методическому обеспечению измерений характеристик

переноса как индивидуальных газов (водорода, гелия, паров воды), так и их смесей, моделирующих составы, необходимые для практического проведения целевых процессов. На основе анализа литературных данных обоснован выбор объектов исследований – цеолитных мембран, производимых в полупромышленном масштабе - капиллярная мембрана MFI (на основе морденита) на подложке из оксида алюминия; трубчатые мембраны MFI, NaA, S-SOD (на основе содалита) и микропористая углеродная мембрана на подложках из оксидов алюминия и титана. Далее представлены экспериментальные установки, которые позволяют проводить эксперименты в трех различных режимах: измерение газоразделительных характеристик чистых газов, бинарных газовых и тройных паро-газовых смесей при потоке исходной смеси до 10 л/мин, давлении до 0.4 МПа в интервале температур 20 – 400°С. Разработаны и подробно описаны методики измерения. В целом, экспериментальную часть можно отнести к несомненным достижениям представленной работы.

**Третья глава** включает анализ полученных результатов и их обсуждение. Полученные экспериментально характеристики проницаемости индивидуальных компонентов в зависимости от температуры и стабильности во времени позволили провести обоснованный отбор мембранных модулей для экспериментов по разделению смесей. Показано, что в тестах с чистыми газами лучшими характеристиками, устойчивыми во времени и превышающими факторы разделения по Кнудсену, обладают капиллярная и трубчатая мембраны MFI. Эти мембраны были отобраны для исследования процессов разделения бинарных смесей  $H_2/He$  на экспериментальной установке. Было изучено влияние состава смеси в диапазоне 0.1 – 20% об.  $H_2$  для капиллярной и 0.1 – 10% об.  $H_2$  для трубчатой MFI композиционных мембран и коэффициента деления потока в интервале 0.1 – 0.8. Определен диапазон коэффициента деления потоков (0.2 – 0.4) соответствующий максимальному фактору разделения. Показано также, что введение в смесь 0.2% паров воды обеспечивает высокую производительность лабораторного мембранного модуля на основе мембран MFI- $Al_2O_3$  и фактор разделения  $H_2O/He$ , равным 10, что можно считать перспективным для разделения таких смесей с тяжелой и сверхтяжелой водой.

В **главе 4** приведены результаты сравнительного расчета параметров процесса и технико-экономическая оценка мембранных каскадов на основе капиллярной и

трубчатой MFI мембран для разделения смесей  $H_2/He$  и  $H_2O/He$  с 0.1% об.  $H_2$  или  $H_2O$  в  $He$ . Установлено, что замена водорода в смеси на пары воды позволяет уменьшить число ступеней каскада в 5.5 раз.

### **Научная новизна исследований и полученных результатов**

Научную новизну рассматриваемой работы составляет совокупность полученных диссертанткой новых экспериментальных данных и оценка применения мембранных каскадов. В частности можно выделить следующие положения:

- получены экспериментальные данные по температурным зависимостям проницаемости водорода и гелия в цеолитных мембранах различной структуры. Проанализирован механизм транспорта водорода в зависимости от температуры;

- получены экспериментальные данные по характеристикам разделения смесей водород-гелий и вода-гелий с помощью полволоконной и трубчатой MFI. Проанализировано влияние состава смеси, температуры и фактора и коэффициента деления потока;

- на основе полученных экспериментальных данных произведено моделирование мембранного каскада для выделения водорода и паров воды на стадии предварительного концентрирования перед ПЕРМКАТ. Выполнена технико-экономическая оценка многоступенчатой мембранной установки.

### **Значимость для науки и практики**

Полученные результаты экспериментальных исследований процессов мембранного разделения, а также результатов моделирования мембранного каскада для выделения водорода и паров воды являются основой для создания непрерывной системы выделения трития и тяжелой воды в технологиях получения энергии на основе термоядерного синтеза.

### **По работе имеются следующие замечания:**

1. Из схемы и описания экспериментальной установки ZIMT III не понятно как осуществлялся контроль содержания воды в газовой смеси, подаваемой на разделение. Необходимо отметить, что содержание воды в

парогазовой смеси ограничивается условиями насыщения, которые в свою очередь зависят от температуры и давления.

2. В тексте диссертации утверждается, что максимальная относительная погрешность измерений не превышала 9% (стр.77), однако на некоторых рисунках, например 3.15-3.17, интервал неопределенности достигает 50% .

3. В поставленной в разделе 1.2.4 задаче предварительного концентрирования, экстракт бланкета представляет собой многокомпонентную смесь гелия, трития, паров сверхтяжелой воды и некоторых других примесей. Однако мембранный каскад рассчитывался только для разделения бинарных смесей гелий-водород и гелий-вода. Интерес представляет рассмотрение разделения трехкомпонентной смеси гелий-водород-вода, так как присутствие воды может повлиять на поток водорода, так же как она повлияла на поток гелия, что приведет к снижению содержания водорода(трития) в пермеате.

4. Бросается в глаза большой объем (половина текста диссертации) литературного обзора, так же в тексте диссертации присутствуют технические ошибки, например на рис.3.17 перепутаны обозначения «слева», «справа», стр. 123 ошибочная ссылка на формулу 4.13, не корректное название раздела 4.3 «Технический расчет...», расчет скорее технологический и т.д.

Несмотря на сделанные замечания, диссертационная работа Борисевич О.Б. в целом представляет законченное исследование, которое можно рассматривать как квалификационную работу, в которой содержится решение задачи применения мембранных процессов для создания замкнутых технологий выделения изотопов водорода для процессов термоядерного синтеза. Диссертационная работа Борисевич О.Б. соответствует паспорту специальности 05.17.18. - Мембраны и мембранная технология, в частности пунктам:

2. Теория мембранных процессов, механизмы переноса компонентов через мембраны различной природы. Кинетика мембранного транспорта.

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

и газовых выбросов, использование процессов и устройств для поддержания жизнедеятельности человека

Достоверность данных, полученных в диссертационной работе О.Б.Борисевич не вызывает сомнений. По материалам диссертации опубликованы 7 статей в рецензируемых научных журналах, входящих в Международную базу данных Scopus, 4 тезиса докладов на международных научных конференциях.

Содержание автореферата полностью отражает содержание диссертационной работы.

Таким образом, диссертационная работа Борисевич О.Б. соответствует всем требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациями (п. 9-14 «Положения о присуждения ученых степеней»), а ее автор Борисевич Ольга Борисовна заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.17.18 – мембраны и мембранная технология (технические науки).

Диссертационная работа Борисевич О.Б. заслушана на расширенном заседании кафедры «Процессы и аппараты химической технологии» Казанского национального исследовательского технологического университета, протокол заседания №3 от 21.12.2017 .

Заведующий кафедрой  
«Процессы и аппараты химической технологии»  
ФГБОУ ВО «Казанский национальный  
исследовательский технологический  
университет»  
д.т.н., профессор

  
Клинов  
Александр  
Вячеславович

Секретарь кафедры  
«Процессы и аппараты химической технологии»  
ФГБОУ ВО «Казанский национальный  
исследовательский технологический  
университет»

  
Рожкова  
Ираида  
Анатольевна

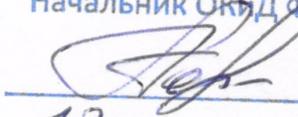
420015, г. Казань, К. Маркса, 68  
[www.kstu.ru](http://www.kstu.ru), e-mail: [office@kstu.ru](mailto:office@kstu.ru)  
Тел.: +7 (843) 231-42-16



  
Климова А.В.  
Доверенной и.к.

удостоверяется.

Начальник ОКД ФГБОУ ВО «КНИТУ»

  
О.А. Перельгина  
«17» 01 2018г.