

## О Т З Ы В

официального оппонента на диссертационную работу О.Б. Борисевич “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. – Мембранные и мембранные технологии

**Актуальность исследования.** Решение энергетической проблемы является одной из основных задач человечества. В соответствии с современными требованиями, процесс производства энергии должен быть по возможности экологически чистым. Это означает постепенный отказ от ископаемых источников энергии, таких как газ и уголь, переработка которых сопровождается выбросами углекислого газа. Кроме того, в обществе нарастает скептическое отношение к энергии, производимой вследствие ядерного распада из-за возможных аварий на электростанциях, а также производства радиоактивных отходов и необходимости их утилизации. В качестве одной из альтернатив рассматривается энергия ядерного синтеза, получение которой лишено вышеуказанных недостатков. Наиболее энергетически выгодной термоядерной реакцией является взаимодействие двух изотопов водорода –дейтерия и трития. Основной проблемой данной технологии является получение трития непосредственно в ядерном реакторе, т.к. он является очень редким элементом, и его природных запасов недостаточно для серийного получения электроэнергии. В рамках одной из предложенных концепций тритий производится при взаимодействии литий-содержащей керамики, покрывающей стенки специального модуля – бридер, находящегося внутри ядерного реактора, с нейtronами, с последующим извлечением из керамического материала при помощи высоких потоков гелия. Выделение трития, содержащегося в смеси в примесных концентрациях, из гелия является сложной технологической задачей. Рассматриваемая диссертационная работа предлагает двухстадийный процесс извлечения трития, основанный на мембранным разделении, на примере извлечения водорода из смесей с гелием. Он комбинирует стадию предварительной концентрации при помощи цеолитных мембран, с последующим полным разделением в каталитическом мембранным реакторе ПЕРМКАТ. Целью работы О. Борисевич является исследование стадии предварительного концентрирования цеолитными мембранами, выполненную на примере разделения смесей водород-гелий в присутствии паров воды, что определяет ее актуальность.

**Научная новизна и практическая значимость.** Научную новизну данной работы составляют полученные О. Борисевич уникальные экспериментальные данные в совокупности

с расчетом и технико-экономической оценкой предложенной технологии, составляющими практическую значимость диссертации. Представлены температурные и концентрационные зависимости характеристик процесса разделения смесей водород/гелий на капиллярных и трубчатых цеолитных мембранах MFI, а также изучено разделение смесей гелий/пары воды в широком диапазоне температур и концентраций. На основе полученных экспериментальных данных рассчитана технологически обоснованная многоступенчатая мембранные установка на основе цеолитных мембран для выделения водорода или паров воды из тока гелия перед каталитическим мембранным реактором ПЕРМКАТ.

**Степень обоснованности и достоверность научных положений и выводов.** Работа выполнена на высоком методическом уровне с применением современных экспериментальных подходов, оригинальных исследовательских установок, апробированных методик измерения и аттестованного аналитического оборудования. Из текста работы видно, что автор понимает суть используемых методов, их возможности и ограничения. Научные положения, выводы и практические рекомендации адекватны материалам исследования, согласуются с его целью и задачами, их обоснованность и достоверность не вызывает сомнения.

**Основное содержание диссертации.** Структура диссертации традиционна. Основной материал диссертации представлен в четырех частях. В первой главе (часть 1) - литературном обзоре (57 страниц, 136 ссылок) – подробно описаны компоненты внутреннего и внешнего топливных циклов, предусмотренных для ИТЭР – экспериментального термоядерного реактора, призванного продемонстрировать возможность этой технологии. Также проведено сравнение и выявлены принципиальные различия между ИТЭР и ДЕМО – первым коммерческим термоядерным реактором. Изложены основные концепции системы выделения трития, полученного в бридере, включая предложенную в данной работе, описан принцип работы реактора ПЕРМКАТ. В литературном обзоре также проведен сравнительный анализ мембран для процессов разделения с участием трития, таких как полимерные, металлические, протон-проводящие и цеолитные мембранны. Наиболее подробно описан транспорт газов в различных цеолитных мембранах, а также зависимости параметров газопереноса от температуры и концентрации, известные в литературе. Особое внимание уделено проницаемости водорода, гелия и паров воды в различных цеолитных мембранах. В выводах к обзору литературы диссидентом обоснован выбор цеолитных мембран для процессов предконцентрирования изотопов водорода.

В Главе 2 описаны объекты исследования, включающие в себя цеолитные мембранны, производимых в полупромышленном масштабе – капиллярная и трубчатая мембранны MFI;

трубчатые мембранные NaA, S-SOD и микропористая углеродная мембрана на подложках из оксидов алюминия и титана. Для каждой мембраны приведен размер транспортных пор (0.25–0.56 нм), отвечающий требованиям разделения гелия, паров воды и изотопов водорода. Также изложены принципы измерения проницаемости газов в установках ZIMT, спроектированных доктором и позволяющих проводить эксперименты в трех различных режимах: измерение газоразделительных характеристик чистых газов, бинарных газовых и тройных паро-газовых смесей. Установки изготовлены в Тритиевой лаборатории Карлсруэ Института технической физики Института технологии Карлсруэ и являются прототипом установок для проведения исследований с участием трития. В целом, экспериментальную часть можно отнести к несомненным достижениям представленной работы.

В третьей главе представлены полученные параметры проницаемости водорода и гелия в зависимости от температуры и стабильности во времени. На основе экспериментальных данных произведен отбор перспективных цеолитных мембран для проведения дальнейших экспериментов по разделению бинарных смесей. Лучшими разделительными характеристиками, в том числе идеальной селективностью, превышающей селективность по Кнудсену, обладают капиллярная и трубчатая мембранные MFI. На этих мембранных было исследовано разделение бинарных смесей H<sub>2</sub>/He в зависимости от состава смеси (0.1 – 20% об. H<sub>2</sub>) и коэффициента деления потока (0.1 – 0.8). На основе полученных данных автором рекомендован интервал коэффициента деления потоков (0.2 – 0.4), при котором фактор разделения достигает максимального значения. Отмечено, что фактор разделения смеси ниже идеальной селективности. Зависимости характеристик разделения мембран от концентрации водорода в смеси при этом не выявлено. В экспериментах со смесями, содержащими пары воды продемонстрирована высокая производительность трубчатых мембран MFI на подложке из Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и фактор разделения H<sub>2</sub>O/He 10, что является перспективным для разделения таких смесей с тяжелой и сверхтяжелой водой.

В Главе 4 приведены результаты моделирования мембранных каскадов с рециркуляцией и произведен его технико-экономический расчет на основе капиллярной и трубчатой мембран MFI для разделения смесей H<sub>2</sub>/He и H<sub>2</sub>O/He с 0.1% об. H<sub>2</sub> или H<sub>2</sub>O в He. Показано, что замена водорода в смеси на пары воды позволяет значительно уменьшить число ступеней каскада, а также капитальные и экономические затраты.

**Публикации, автореферат.** По материалам докторской диссертации опубликованы 7 статей в рецензируемых научных журналах, входящих в Международную базу цитирования Scopus, 4 тезиса докладов на международных научных конференциях. Содержание автореферата соответствует содержанию докторской диссертации.

В качестве замечаний к работе следует отметить следующее:

1. Присутствуют небрежности в представлении материалов диссертации. К примеру, на схемах экспериментальных установок не везде расшифрованы условные обозначения и аббревиатуры (рис. 2.7-2.10). Не ясно, что обозначают заштрихованные участки газовых линий на рис. 2.9 и 2.10; пересекаются ли газовые линии в области обозначения нагревателей EZ003 и EZ004 на рис. 2.10. Не комментируется, с чем связано усложнение линии подачи гелия в Зем варианте установки с криоловушками (рис. 2.10) по сравнению с вариантом с абсорберами (рисунок 2.9).
  2. Не приводятся принципиальные схемы устройства и технические особенности мембранных модулей, которые использовались для экспериментов.
  3. Автор не поясняет, почему для исследования капиллярных мембран был выбран температурный диапазон (20-400)°С, а для трубчатых (20-130)°С.
  4. В описании З варианта установки упоминается необходимость напрямую измерять поток реагентата и концентрацию примеси – возможно ли было определить эти величины из уравнения материального баланса мембранныго модуля?
  5. Не ясно сформулировано, что подразумевалось под проведением повторного измерения проницаемости гелия через мембрану NaA после хранения в лаборатории в течение нескольких месяцев. Предварительное кондиционирование данной мембраны не проводилось?
  6. Не указывается, через какое время устанавливались стационарные значения парогазовых потоков через мембранны (выход на режим) перед началом измерений в экспериментах.
  7. Не поясняется, с чем связаны большие погрешности измерений для разделительных характеристик трубчатых мембран по сравнению с капиллярными (рис. 3.19).
- В целом, наличие указанных замечаний не снижает ценности полученных научных результатов, работа вносит существенный вклад в развитие технологий выделения изотопов водорода в непрерывном режиме для процессов термоядерного синтеза.
- Соответствие работы требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям.**
- Диссертационная работа О.Б. Борисевич представляет собой законченную научно-квалификационную работу и соответствует паспорту специальности 05.17.18 – мембранны и мембранные технологии (технические науки), п.2 «Теория мембранных процессов, механизмы переноса компонентов через мембранны различной природы. Кинетика мембранныго транспорта», п.4 «Технологические схемы с применением мембранных процессов, их экономическое и экологическое обоснование» и 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».

По своей новизне, объему результатов, научной и практической значимости диссертационная работа полностью удовлетворяет требованиям ВАК и пп. 9-14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» (Постановление Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842). Автор диссертации Борисевич Ольга Борисовна заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.17.18 – мембранные и мембранные технологии (технические науки).

Официальный оппонент

Трубянов Максим Михайлович

10.01.2018г.

кандидат технических наук, с.н.с. кафедры Нанотехнологии и биотехнологии Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева,  
603950, Нижний Новгород, ул. Минина, 24, ауд. 1221  
тел. 8(831)4360361  
m.trubyanov@yandex.ru

Подпись Трубянова М.М. заверена

Ученый секретарь НГТУ

И.Н. Мерзляков

