

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе
ФБГОУ ВО «Санкт-Петербургский
государственный университет»
199034 Санкт-Петербург
Университетская наб., д 7/9
Апионов Сергей Витальевич



«26» апреля 2018 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу ЧЕРКЕЗА Дмитрия Ильича
**«Исследование проникновения изотопов водорода через
низкоактивируемые материалы»**, представленную на соискание ученой
степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.04 –
«Физическая электроника»

Диссертационная работа Д.И. Черкеза посвящена решению актуальной задачи – исследованию физических процессов, возникающих при взаимодействии конструкционных материалов плазменных приборов и установок с изотопами водорода, а именно проникновения изотопов водорода через эти материалы. В качестве объектов исследования в работе рассматривались: плазменно-осаждённые на подложки из мелкозернистого графита вольфрамовые покрытия толщинами от 0,5 до 200 мкм, ферритно-мартенситная сталь ЭК-181, аустенитная сталь ЧС-68, сплав V-4Ti-4Cr, в том числе с осаждёнными однослойным и многослойным AlN защитными покрытиями. На основании проведённых экспериментальных исследований, получены характеристики исследованных материалов, позволяющие рассчитывать проникающие потоки изотопов водорода сквозь эти материалы, а также рассмотрены важные аспекты, связанные с функционированием данных материалов в широком диапазоне условий, в том числе соответствующим условиям эксплуатации этих материалов в термоядерных реакторах.

Диссертация Черкеза Д.И. состоит из Введения, трех глав, Заключения, Списка сокращений, Благодарностей, Списка публикаций автора по теме диссертации и Списка цитируемой литературы из 210 наименований. Работа изложена на 210 страницах, содержит 95 рисунков и 14 таблиц.

Актуальность

С развитием науки использование плазменных приборов и установок в промышленности приобретает всё большее значение. Наиболее сложными в настоящий момент плазменными установками являются установки для исследований в области управляемого термоядерного синтеза (УТС). УТС является одним из перспективных источников энергии будущего. Для

реализации данной идеи в ряде мировых стран ведутся научные изыскания и проектно-конструкторские работы. В настоящий момент, ряд стран участвуют в создании международного термоядерного реактора ИТЭР. Данный проект является крайне важным этапом на пути освоения УТС и должен способствовать разрешению целого ряда физических и инженерных проблем и задач. Кроме того, развитие установок термоядерного синтеза плазменных технологий является целью разрабатываемой Национальной программы развития УТС и плазменных технологий. К материалам перспективных установок следующих поколений предъявляется ряд требований: термомеханическая стойкость и стабильность в условиях облучения термоядерными нейтронами, ускоренный спад наведённой активности после окончания облучения, для реализации концепции малоактивируемых материалов, и целый спектр требований, связанных с функциональным назначением материалов (совместимость с теплоносителями) и т.д. В то же время, в современных термоядерных установках топливом является разогретая до высоких температур смесь изотопов водорода – дейтерия и трития. Тритий, являясь радиоактивным и дорогим элементом, доступен в ограниченных количествах, а его воспроизводство в условиях ТЯР близко к единице, что накладывает ряд ограничений на его накопление в материалах ТЯР и величину его утечек, в том числе через конструкционные материалы. Таким образом, вопрос взаимодействия трития в виде газа и плазмы, а также ряд особенностей, связанных с функционированием ТЯР (низкие давления, кондиционирование стенок, плазменное облучение) представляются крайне важным, и требует глубокого и многостороннего исследования. Совершенно оправдано использование для таких исследований стабильного изотопа водорода – дейтерия.

Представленные в диссертационной работе Черкеза Д.И. результаты исследования водородопроницаемости перспективных для применения в ТЯР конструкционных и обращённых к плазме материалов, разработанные методы и подходы для получения экспериментальных данных, а также рассматриваемые особенности, представляются актуальными и важными для исследования задачами.

Анализ содержания диссертации

Во введении автором обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цели и задачи работы, перечислены положения, выносимые на защиту, указаны научная новизна и практическая значимость полученных результатов, представлена апробация результатов работы, выделен личный вклад.

Первая глава диссертации представляет собой литературный обзор, состоящий из шести подпунктов и заключения. В главе показана перспективность и важность решаемой задачи для сооружения термоядерных источников нейтронов, которые могут быть использованы для решения целого спектра задач: наработка топлива для тепловых реакторов, реализации концепции гибридной термоядерной энергетики (реакторы синтез-деление), тестирование материалов и так далее. Затронуты основные аспекты взаимодействия быстрых нейтронов с материалами и показана перспективность использования малоактивируемых под воздействием нейтронного облучения материалов. Рассмотрены основные классы материалов в настоящий момент

использующихся и перспективных для использования в ТЯР. Вторая часть первой главы посвящена рассмотрению процессов проникновения изотопов водорода через различные материалы, приведены наиболее часто используемые аналитические модели описания данных процессов. Представлен детальный обзор по проникновению изотопов водорода через различные материалы, сгруппированные в работе по классам: пористые образцы (графиты, углеграфитовые композиты), стали различных типов, ванадиевые сплавы и уделено пристальное внимание рассмотрению водородопроницаемости в ТЯР-подобных условиях (низкие давления, состояние поверхности, плазменное облучение).

Вторая глава диссертации посвящена описанию экспериментальной установки «ПИМ» и её масштабной модернизации выполненной соискателем, а также описанию разработанных и используемых в работе экспериментальных методик и подходов. Стоит отметить значительный объём проведённых работ, что привело к повышению качества экспериментальной установки, и было отражено в соответствующих публикациях в рейтинговых журналах, а также в охраняемых результатах интеллектуальной деятельности.

В третьей главе представлены основные экспериментальные результаты исследования поведения изотопов водорода в материалах. Представлены результаты исследований различных вольфрамовых покрытий, применяемых в ТЯР. Отмечено существенное влияние состояния поверхности и процессов на ней происходящих в условиях близких к таковым в ТЯР. На примере исследования аустенитной стали ЧС-68 показано, что после облучения лицевой поверхности стали ионами аргона, проникновение изотопов водорода из газовой фазы даже в области низких давлений может происходить в режиме близком к ограниченному диффузией. В то же время, для ферритно-мартенситной стали ЭК-181 в достаточно широком диапазоне давлений, на проникновение дейтерия из газовой фазы существенное влияние оказывает состояние поверхности, что в результате приводит к снижению проникающих потоков на 2-3 порядка величины в диапазоне давлений характерных для ТЯР относительно уровня проникновения из газовой фазы. Также приведены результаты исследования проникновения изотопов водорода через перспективный низкоактивируемый сплав ванадия V-4Ti-4Cr. Было показано, что даже с учётом наличия на поверхностях сплава слоёв стойких производственных окислов, V-4Ti-4Cr сплав демонстрирует высокую водородопроницаемость, что накладывает ограничения на его применение в качестве конструкционного материала. В то же время, сплав может быть использован для селективной очистки изотопов водорода. Для снижения величины проникающих потоков целесообразно использовать покрытия подавляющие проницаемость водорода, для этого в работе автором были исследованы защитные однослойное и многослойное покрытия из AlN, показавшие снижение величины проникающих потоков из газовой фазы до 6 раз. В заключении по третьей главе на основании полученных результатов, проведены численные оценки проникающих потоков для установки масштаба ДЕМО-ТИН.

В Заключении работы сформулирован перечень основных результатов работы.

Оценка новизны исследования

В рамках диссертационной работы Черкезом Д.И. впервые исследованы:

- газовая проводимость вольфрамовых покрытий толщиной 0,5–200 мкм осаждённых на графитовую подложку различными плазменными методами (MS-W, PVD-W, VPS-W), используемых в качестве обращенных к плазме материалов в современных токамаках;

- влияние плазменного облучения на перенос дейтерия в отечественной ферритно-мартенситной стали ЭК-181 и через отечественную аустенитную сталь ЧС-68 в режиме проницаемости ограниченном диффузией, получены коэффициенты проницаемости, диффузии и растворимости;

- плазменная проницаемость сплава V-4Ti-4Cr производства ВНИИНМ им. А.А. Бочвара при облучении дейтериевой плазмой и влияние защитных однослойного и многослойного AlN покрытий на проницаемость дейтерия из газовой фазы и при облучении плазмой.

Выносимые на защиту положения отражают новизну исследования и оригинальность полученных результатов.

Оценка практической значимости результатов диссертационной работы

Результаты проведенных исследований представляют фундаментальный интерес для понимания процессов проникновения изотопов водорода под воздействием плазменного облучения и из газа через поликристаллические металлы и вольфрамовые покрытия, а также могут быть использованы для обоснования выбора конструкционных и обращенных к плазме материалов для плазменных приборов и термоядерных установок следующего поколения. Полученные экспериментальные данные позволяют оценить утечки трития в плазменных и термоядерных установках, учесть влияние материалов на топливный цикл ТЯР. Модернизированный экспериментальный стенд может использоваться для измерения проникающих потоков изотопов водорода из плазмы и из газа через конструкционные и обращенные к плазме материалы электронных приборов, плазменных и термоядерных установок, материалы и системы, для которых актуален вопрос проникновения изотопов водорода.

Полученные в диссертации результаты можно рекомендовать к использованию при исследованиях и разработках электронных приборов и плазменных установок в следующих организациях: Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, АО НИИЭФА им. Ефремова и институте прикладной физики РАН, РФЯЦ ВНИИЭФ (г. Саров), ВНИИНМ им. академика А. А. Бочвара, АО «ТВЭЛ».

Оценка достоверности и обоснованности научных положений, результатов и выводов базируется на использовании лучших современных средств измерения и контроля условий экспериментов, воспроизводимости результатов при повторении экспериментов, сравнении с результатами других исследователей.

Основные результаты диссертации опубликованы в 36 докладах и статьях, среди них 4 статьи в рецензируемых научных журналах и изданиях входящих в перечень ВАК и 2 патента. Результаты работы докладывались и обсуждались на 29 международных и всероссийских конференциях, семинарах и научных школах различного уровня.

Замечания по диссертационной работе

1. По результатам исследований вольфрамовых покрытий не сделан вывод о том, какие характеристики могут ожидать у плёнок вольфрама, которые будут образовываться в будущих термоядерных реакторах в результате перепыления обращенного к плазме вольфрама, хотя это был бы очень полезный вывод по результатам данной работы.
2. В рамках работы проведены исследования только сталей ЭК-181 ферритно-мартенситного класса и ЧС-68 аустенитного класса. В то же время существующие отечественные установки изготавливаются из стали 12Х18Н10Т, а большинство зарубежных – из сталей SS316 или SS304. Было бы полезно, помимо сравнений с данными других исследователей, которые привёл автор, провести исследования характеристик какой-либо из используемых в настоящий момент в термоядерных установках сталей в тех же режимах и на том же стенде, в которых эти исследования проведены для сталей ЭК-181 и ЧС-68.
3. Из приведённых экспериментальных результатов неочевидно, какое количество образцов каждого вида использовалось при исследовании проницаемости сталей.
4. В работе содержится 95 рисунков, многие из которых представляют графики, перегруженные экспериментальными данными, что затрудняет их восприятие. Представляется, что для подтверждения выносимых на защиту положений не стоило излишне перегружать работу экспериментальными данными, так как это затрудняет её восприятие.

Заключение

В целом, диссертационная работа Черкеза Д.И. выполнена на высоком научном уровне, в ней получены интересные и физически значимые результаты и является законченной научно-квалификационной работой, выполненной автором самостоятельно. Автореферат в полной мере отвечает содержанию диссертации, которая соответствует специальности 01.04.04 - «Физическая электроника». В опубликованных работах достаточно полно отражены основные результаты и выносимые на защиту положения. Текст диссертации характеризуется полнотой изложения вопроса и научной зрелостью представленных результатов, сделанных оценок и выводов. Отмеченные недостатки не снижают ценности полученных результатов и не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы.

Полученные данные представляют интерес для организаций, работающих с радиоактивным изотопом водорода – тритием.

Диссертационная работа Черкеза Дмитрия Ильича на тему **«Исследование проникновения изотопов водорода через низкоактивируемые материалы»** по объёму полученных данных, новизне поставленных и решенных задач, научному и практическому значению результатов, соответствует требованиям ВАК Минобрнауки РФ и удовлетворяет требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.04 - «Физическая электроника».

Отзыв составил кандидат физико-математических наук, доцент кафедры Электроники твёрдого тела федерального государственного бюджетного

образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет», Евгений Александрович Денисов.
Диссертация рассмотрена, а отзыв обсуждён и одобрен на заседании кафедры Электроники твердого тела, протокол № 3 от 24 апреля 2018 г.

Заведующий кафедрой Электроники твердого тела СПбГУ, доктор физико-математических наук, профессор



Александр Петрович Барабан



26.04.2018

Сведения о ведущей организации
ФБГОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет»,
Адрес: 199034 г. Санкт-Петербург, Университетская наб. 7/9. Тел. +7(812) 328-20-00, эл. почта: spbu@spbu.ru, сайт: spbu.ru