

Отзыв официального оппонента

на диссертацию Черкеза Дмитрия Ильича «Исследование проникновения изотопов водорода через низкоактивируемые материалы», представленную к защите в диссертационный совет Д 520.009.02 на базе НИЦ «Курчатовский институт» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.04 — «Физическая электроника».

- 1. Актуальность темы диссертации.** Тема диссертации, несомненно, актуальна. Основное внимание уделяется анализу кинетики переноса изотопов водорода сквозь конструкционные материалы в контексте актуальных задач развития ядерной, водородной и (в перспективе) термоядерной энергетики. Несмотря на богатый экспериментальный материал, накопленный десятилетиями, до сих пор нет ясности в понимании (на современном уровне требований к детализации), например, закономерностей водородного охрупчивания и разрушения конструкционных материалов (что принципиально важно для оценки ресурса безопасности ТВЭЛов), особенностей взаимодействия с изотопами водорода из плазмы в экстремальных условиях эксплуатации материалов. В значительной мере это вызвано использованием различных экспериментальных методик и образцов, имеющих различную микроструктуру, химический состав. Что есть следствие особенностей эксперимента, а что есть общее, характерное именно для условий промышленной эксплуатации материалов? Необходимо привести имеющиеся данные к общему знаменателю, поскольку отсутствие четких теоретических представлений и практических рекомендаций связано с дополнительными затратами на экспериментальные исследования и невозможностью надежно прогнозировать ресурс работоспособности конструкционных материалов в зависимости от конкретных технологических требований. Кроме того, идет активный поиск новых материалов для различных подсистем энергетических установок с учетом повышенных требований безопасности. Тестирование этих материалов на водородопроницаемость совершенно необходимо. Актуальность темы диссертации не вызывает сомнений.
- 2. Научная новизна и основные результаты**
 - 1) Исследована водородопроницаемость вольфрамowych покрытий, осаждённых на графитовую подложку различными плазменными методами, используемых в токамаках.
 - 2) Проведен анализ влияния плазменного облучения на перенос дейтерия в отечественных ферритно-мартенситной и аустенитной сталях (ЭК-181 и ЧС-68). Выявлены лимитирующие процессы.
 - 3) Исследована плазменная проницаемость перспективного сплава V-4Ti-4Cr при облучении дейтериевой плазмой и влияние защитных (изоляционных) однослойного AlN и многослойного плазменно-напылённых покрытий на проницаемость дейтерия из газовой фазы и при облучении плазмой.
- 3. Степень обоснованности.** Все основные результаты и выводы, представленные в диссертации убедительно аргументированы и строго научно обоснованы.
- 4. Практическая значимость работы и рекомендации по использованию.** Полученные экспериментальные данные и их теоретический анализ позволяют оценивать утечки и на-

копление трития в плазменных и термоядерных установках, проводить моделирование топливного цикла, оборота трития и его накопления в обращённых к плазме конструкционных материалах. Результаты проведенных исследований целесообразно использовать на этапе обоснования выбора конструкционных и обращенных к плазме материалов при разработке перспективных энергетических установок.

Особенно хотелось бы отметить обстоятельный критический анализ научной литературы по теме диссертации. Представленный обзор свидетельствует не только о тщательности выбора и проработки темы, но и о высокой научной квалификации диссертанта.

5. **Замечания.** По работе имеются замечания. В соответствии со своей научной специализацией, естественно, буду обращать более пристальное внимание математическим формулировкам и корректности численных методов обработки экспериментальных данных.

- 1) Вначале редакционное замечание. В тексте имеется некоторое количество опечаток, но в допустимых пределах незначительной статистической погрешности. В том числе и при наборе формул. Например, в (1.11)–(1.13) должно быть единое обозначение c_t . В (1.16) имеется в виду не поверхностная концентрация, а приповерхностная объемная (k_r – эффективный коэффициент рекомбинации). Иначе модель нужно дополнять связью указанных концентраций (в простейшем случае с помощью коэффициента быстрого растворения). Что касается фразы «при больших временах экспоненциальный ряд сходится» (первая строка стр. 43), то: ряд сходится при всех $t > 0$, диссертант имел в виду стремление суммы в (1.18) к нулю с ростом t . После (1.21) словосочетание «равновесный проникающий поток» нужно заменить на «стационарный (установившийся)...». В (1.25) после второго равенства пропущен «-», коэффициенты $D_{b,f}$ объемные (поверхностная диффузия не рассматривается). Фраза на стр. 97 «в ходе эксперимента могут регистрироваться: ... распределение концентрации проникающего газа по толщине образца» скорее относится к отдаленным перспективам измерительной техники. Упоминание о том, что «особенности на фронтах кривых проницаемости... имели тенденцию к повторению» (стр. 126) не воспринимается как физико-математическая формулировка наблюдаемого явления. Впрочем, подобные мелкие опечатки и оговорки в тексте не влияют на понимание сути работы, помогает контекст.
- 2) Утверждается, что «в режиме DLR (1.18) проникающий поток не зависит от коэффициентов рекомбинации» (стр. 42). Предварительно оговорюсь, что в диссертации не рассматриваются модели, в которых явно выделена поверхность. Дальнейшие рассуждения – в этом, принятом диссертантом, приближении. Приповерхностный объем находится в динамическом квазиравновесии (встречные потоки абсорбции с коэффициентом s и десорбции, которая моделируется в терминах приповерхностной объемной концентрации и эффективного коэффициента рекомбинации k , примерно равны). В рамках любой адекватной модели получится, что растворимость $S = S(s, k, \dots)$. Эти поверхностные и объемные характеристики не яв-

ляются независимыми, так что коэффициент рекомбинации k влияет на проникающий поток, только неявно посредством S (в формуле (1.18) k явно «не видно»). Утверждение повторяется по тексту, например, на стр. 100.

- 3) В работе используется соотношение Ричардсона: «также определение коэффициента растворимости возможно из экспериментов по проницаемости (1.20): $S = P/D$ » (стр. 43, 100). При использовании даже «общеупотребительных» формул следует учитывать, при каких предположениях они выведены. Рассмотрим плоскую мембрану и установившуюся плотность проникающего («слева направо») диффузионного потока $J = -Dc_x = D[c_0 - c_L]/L$. В предположении квазиравновесности (!) подставляем выражения для концентраций из закона Сивертса $c = Sp^{1/2}$. Получаем $J = P[p_0^{1/2} - p_L^{1/2}]/L$, где $P = SD$ – проницаемость. Возникают вопросы. Растворимость обычно определяют в экспериментах «насыщение-дегазация», то есть участвует весь поглощенный образец водород, включая захваченный в ловушки (дефекты структуры, возможные включения гидридной фазы,...). А формула $J = \dots$ относится к растворенному диффузионно подвижному водороду. Для «пористого графита» ошибка по порядку гарантирована. Это одна из причин «разброса данных у разных авторов», даже не учитывая разнообразие условий эксперимента. Второй вопрос. Насколько давление в 1 Па (стр. 101) можно считать большим для предположения о квазиравновесной входной концентрации и адекватности DLR аппроксимации на рис. 2.14? Третий вопрос. Достаточно ли точны соотношения (2.4), выведенные для плоской мембраны, при их использовании для образцов-трубок (в цилиндрических координатах уравнение диффузии несколько иное)? Разве что радиус можно считать очень большим. См. также рис. 3.15 на стр. 135.
- 4) На стр. 114 читаем: «зависимости проникающего потока от перепада давлений линейны, что свидетельствует о молекулярном режиме течения газа в этом диапазоне давлений». Возможна и другая причина (в контексте класса моделей, используемых в диссертации): если в балансе потоков «абсорбция–десорбция = диффузия» правую часть уже нельзя считать относительным нулем, то и атомарная проницаемость приведет к переходу от корневой к линейной зависимости от давления. Аналогичные утверждения автора диссертации встречаются и далее по тексту (например, стр. 120).
- 5) Что касается покрытий для снижения водородопроницаемости, то хорошо известна проблема: защитный эффект падает на порядки после циклической нагрузки (появляются трещины, отслоения...). В тексте, вероятно, следовало бы более подробно остановиться на проблеме оценки скорости деградации покрытий.

Несмотря на приведенные замечания, рецензент высоко оценивает научный уровень диссертации. Выскажу общее впечатление. Гораздо интереснее читать работы, к которым, при желании, можно придраться, но в которых просматриваются новые инте-

ресные продолжения и свежие постановки задач. Данная работа из этого класса. И это заслуга автора диссертации и его научного руководителя.

Вполне возможно, что обнаруженное диссертантом локальное несоответствие модельных и экспериментальных кривых является всего лишь следствием участия в модели только одного параметра диффузии, в то время как процесс переноса многостадийный и многопараметрический. А когда весь процесс необходимо «втиснуть в один параметр», то линейности, постоянства, независимости и т.п. ожидать не приходится.

Работа содержит фундамент для дальнейшего развития методов математического моделирования: диссертант привел в соответствие мировому уровню экспериментальную установку, и теперь, после существенного повышения точности измерений, необходимо «подтягивать» более детализированные модели, чтобы помимо коэффициента диффузии корректно оценивать параметры поверхностных процессов и захвата диффузанта в объеме (интерес к этим характеристикам материалов нарастает). Высказанное не противоречит мнению о «законченности представленной к защите работы».

Выносимые на защиту положения, выводы и результаты работы опубликованы в ведущих рецензируемых журналах и изданиях, соответствующих тематике диссертации, таких как «Journal of Nuclear Materials», «Приборы и техника эксперимента», «Fusion science and technology», апробированы на международных конференциях и семинарах. Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертации.

6. **Заключение.** Диссертационная работа Черкеза Дмитрия Ильича «Исследование проникновения изотопов водорода через низкоактивируемые материалы» соответствует специальности 01.04.04 — «Физическая электроника» и всем критериям, отражённым в пунктах 9-14 «Положения о присуждении учёных степеней», утверждённого постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 года, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук.

Гл. науч. сотр., рук. лаб. моделирования природно-технических систем
Института прикладных математических исследований
Федерального исследовательского центра
«Карельский научный центр Российской академии наук»
(185910 Петрозаводск, ул. Пушкинская 11, krcras@karelia.ru),

д.ф.-м.н., проф. Ю.В. Заика

Подпись Заики Юрия Васильевича заверяю:
Ученый секретарь КарНЦ РАН

к.г.-м.н. П.А. Рязанцев

7 мая 2018 г.

