

**Сведения о ходе выполнения проекта по соглашению №14.613.21.0009 от 26.08.2014 г.  
(Руководитель проекта – кандидат физико-математических наук А.В. Спицын)**

1. В ходе выполнения проекта «Исследование поведения изотопов водорода в материалах термоядерных реакторов» по Соглашению о предоставлении субсидии №14.613.21.0009 от 26 августа 2014 года с Министерством образования и науки России в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы» на этапе №2 в период с 1 января по 30 июня 2015 года выполнялись следующие работы:

1. Проведены экспериментальные исследования накопления дейтерия в повреждённых образцах вольфрама и сплава вольфрам-рений методом термодесорбционной спектроскопии.
2. Проведено экспериментальное исследование проникновения дейтерия через аустенитную сталь ЧС-68
3. Подготовлен промежуточный отчет о ПНИ и рассмотрен на научно-техническом совете ККФХТ НИЦ "Курчатовский институт".
4. Разработана отчетная документация за 2 этап работ по соглашению в соответствии с требованиями нормативных актов Минобрнауки России.

Кроме того, иностранным партнером – центром водородных исследований университета города Тояма выполнены следующие работы:

5. Проведены экспериментальные исследования модификации поверхности экспериментальных образцов вольфрама и сплава вольфрам-рений, поврежденных мощными потоками энергии или электронными пучками высоких энергий методами сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии.

При этом были получены следующие результаты:

Проведено экспериментальное исследование накопления дейтерия в повреждённых образцах вольфрама и сплава вольфрам-рений методом термодесорбционной спектроскопии;

Проведено экспериментальное исследование проникновения дейтерия через аустенитную сталь ЧС-68. Исследование накопления изотопов водорода в образцах вольфрама, поврежденных электронным пучком до дозы  $2,7 \cdot 10^{18}$  е/м<sup>2</sup>, проводилось методом термодесорбционной спектроскопии. Показано, что захвату дейтерия в дефектах, созданных электронным пучком, соответствует пик при 750 К, который растет с увеличением дозы облучения. Положение максимумов для данных типов ловушек в экспериментах с плазменным облучением обычно наблюдается при меньших температурах, однако особенность данных экспериментов в очень глубоком профиле повреждений, поэтому положение пика смещается в область больших температур. При этом, увеличение захваченного дейтерия в ловушках, созданных электронами высоких энергий, при использованных дозах не превышает 30%. Кроме того, показано, что присутствие рения само по себе не создает новых ловушек водорода в вольфраме. Различия в накоплении дейтерия в W и W-Re (в тех случаях, когда они есть) связаны с отличающейся микроструктурой сплава, а не с примесью рения. В интервале 1–10 % содержания рения (диапазон возможной концентрации рения в вольфрамовых покрытиях и материалах установки ИТЭР) непосредственно содержание примеси рения не влияет на захват. Поэтому трансмутация W в Re в результате облучения нейтронами не окажет заметного влияния на захват водорода в вольфрамовых материалах ТЯР.

При измерении проникающего потока дейтерия через сталь ЧС-68 получена зависимость проникающего потока от давления близкой к корневой  $J \sim p^{0,53}$ . На основании

проведённых экспериментальных исследований и полученных в них данных, были рассчитаны коэффициент диффузии  $D$  и константа проницаемости  $P$ . Константу проницаемости для стали ЧС-68 можно определить как  $P = 1,24 \cdot 10^{-7} \cdot \exp(-60,2 \text{ [кДж/моль]/RT})$ , моль/(м·с·Па<sup>0.5</sup>), а коэффициент диффузии стали ЧС-68 –  $D = 3,7 \cdot 10^{-6} \cdot \exp(-59 \text{ [кДж/моль]/RT})$ , размерность коэффициента – [м<sup>2</sup>/с], что близко к величинам для иностранного аналога – стали SS316. Используя эти параметры, можно оценить проникающий поток дейтерия через произвольную поверхность из стали ЧС-68, в диффузионно-ограниченном режиме (оценка проникающего потока сверху), в диапазоне давлений от 0,1 до 100 Па, и температурном диапазоне 350–600 °С.

Кроме того, было показано, что при облучении образцов горячекатаного W и W-5 % Re низкоэнергетической (76 эВ/ион) дейтериевой плазмой с высоким значением потока ионов (около  $10^{22}$  D/м<sup>2</sup>с) до дозы  $10^{26}$  D/м<sup>2</sup> морфологии поверхности зависит от температуры облучения незначительно. В процессе плазменного облучения при температурах в интервале от 348 до 673 К на поверхностях W и W-5 % Re формируются блистеры размером от 1 до 20 мкм. Размеры и поверхностная плотность блистеров на поверхности W увеличиваются с ростом температуры облучения до 523 К, затем начинают уменьшаться при температурах свыше 583 К. В свою очередь, на поверхности W-5 % Re эта переходная температура облучения сдвигается в сторону меньших температур, т.е., плотность и размеры блистеров начинают уже уменьшаться при температурах свыше 523 К. Различие в температурных зависимостях блистерообразования на поверхности этих материалов может быть объяснено, в первом приближении, различием в температурной зависимости пластичности для W и W-5 % Re материалов.

Использованные в работе методы и установки оцениваются на уровне лучших мировых аналогов. Установка по измерению проникающих потоков изотопов водорода через металлы «ПИМ» после модернизации по совокупности характеристик (доступные размеры образца, наличие плазменного источника для чистки поверхности образца, точность и минимальные значения измеряемых потоков, остаточный вакуум) занимает уникальное положение.