

**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 №1 в период с 26 августа по 31 декабря 2014 года выполнялись следующие работы:

1. Выполнен аналитический обзор современной научно-технической, нормативной, методической литературы, затрагивающей научно-техническую проблему, исследуемую в рамках ПНИ.
2. Проведены патентные исследования в соответствии ГОСТ Р 15.011-96 и подготовлен отчет о патентных исследованиях.
3. Выполнен выбор и обоснование направления и объекты экспериментальных исследований, аппаратных средств, средств разработки программ, способов представления данных.
4. Изготовлены экспериментальные образцы вольфрама и сплава вольфрам-рений.
5. Изготовлены экспериментальные образцы из бронзы CuCrZr и аустенитной стали.
6. Выполнена модернизация стенда для измерения проникновения изотопов водорода через металлы (установки «ПИМ»).
7. Разработан метод облучения экспериментальных образцов вольфрама и сплава вольфрам-рений электронами высоких энергий.
8. Выполнено облучение экспериментальных образцов вольфрама электронами высоких энергий.
9. Разработан метод насыщения экспериментальных образцов вольфрама тритием для наработки радиогенного гелия в объеме материала.
10. Разработана программа и методика экспериментальных исследований.
11. Подготовлен промежуточный отчет о ПНИ и рассмотрен на научно-техническом совете ККФХТ НИЦ "Курчатовский институт".
12. Разработана отчетная документация за 1 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:

13. Разработан метод измерения захвата трития/дейтерия в поврежденных электронами высоких энергий образцах вольфрама и сплавах вольфрам-рений с использованием метода рентгеновской люминесценции образцов, насыщенных тритием.
14. Изготовлены экспериментальные образцы вольфрама и сплава вольфрам-рений из японских типов сплавов

При этом были получены следующие результаты:

При выполнении работы выполнен аналитический обзор современной научно-технической, нормативной, методической литературы, затрагивающей научно-техническую проблему, исследуемую в рамках ПНИ. В результате обзора показано, что несмотря на актуальность запланированных исследований влияния повреждений материалов, таких как наработка радиогенного гелия, на захват и накопление изотопов

водорода, экспериментальных исследований в этом направлении практически не проводилось.

Проведены патентные исследования в соответствии ГОСТ Р 15.011-96 по направлению ПНИ. Результаты патентных исследований свидетельствуют о том, что патентов Российской Федерации, препятствующих проведению работ на дату окончания поиска не обнаружено и проведенные патентные исследования позволят в дальнейшей работе выявить направление и форму охраны созданных результатов научно-технической деятельности.

Проведен выбор и обоснование направления и объектов экспериментальных исследований, аппаратных средств, средств разработки программ, способов представления данных. В качестве объектов исследования выбраны:

- поликристаллический вольфрам. В настоящий момент во многих термоядерных установках вольфрам используется в качестве обращенного к плазме материала, принимающего на себя наибольшие нагрузки энергии и частиц;
- вольфрам, легированный рением. Легирование, в том числе рением, предлагается использовать для повышения пластичности вольфрама, вследствие чего упрощается его механическая обработка;
- аустенитные стали. Аустенитные стали в настоящий момент широко используются в качестве конструкционных материалов термоядерных установок;
- CuCrZr бронза. Бронза широко используется как теплоотводящий материал, на который крепится вольфрамовая облицовка камер термоядерных установок.

Исходя из поставленных задач было принято решение использовать следующее научно-техническое оборудование:

- Стенд ПИМ (НИЦ «Курчатовский институт») будет использован для исследования проницаемости водорода из газа при давлениях до 0,1 атм.
- Сверхвысоковакуумный стенд АТЛАН (НИЦ «Курчатовский институт») будет использован для экспозиции образцов при давлениях до 0,5 атм. и температуре от комнатной до 700 С.
- Радиогенный гелий будет введен в образцы методом «третиевого трюка».
- Для облучения электронами и мощным тепловым потоком будет использована установка ЭХО (НИЦ «Курчатовский институт») представляющая собой линейный резонансный электронный ускоритель со стоячей вольной. Установка позволяет получить пучок электронов со следующими параметрами: энергия электронов 3-5 МэВ, импульсный ток электронного пучка до 100 мА, длительность импульса 4-5 мс, частота 100 Гц, средняя мощность пучка до 1 кВт.
- Накопление изотопов водорода будет исследовано путем термодесорбционных (ТДС) измерений на ТДС-стенде (НИЯУ МИФИ), позволяющем регистрировать ТДС-спектры до температуры 1700 К при различных скоростях нагрева образца.
- Структурные изменения покрытия будут исследованы с помощью сканирующего и просвечивающего электронных микроскопов.

Были изготовлены экспериментальные образцы вольфрама и сплава вольфрам-рений размером 10*10*0,8 мм из поликристаллического вольфрама производства компании Goodfellow, а так же образцы размером 9,8*9,8*1,2 мм из поликристаллического вольфрама со специальной ориентацией кристаллитов отечественного производства для исследования накопления изотопов водорода в этих материалах.

Изготовлены экспериментальные образцы из бронзы CuCrZr и аустенитной стали для измерения проникающих потоков изотопов водорода через эти материалы. Изготовленные образцы представляют из себя трубки из аустенитной реакторной стали ЧС-68, сваренную с вакуумный фланец, а так же пластину из сплава CuCrZr, вакуумно уплотненную с использованием металлической прокладки.

Проведена модернизация установки для измерения проникновения изотопов водорода через металлы (установки «ПИМ»). Изготовлены дополнительные модули вакуумной

откачки, калибровки квадрупольного масс-спектрометра и очистки рабочего газа. В результате модернизации был создан модуль для калибровки квадрупольного масс-спектрометра, используемого для измерения газовых потоков проникающих через металлические образцы и абсолютная точность измерения проникающих потоков возросла до 1-2%, достигнуты вакуумные условия $1 \cdot 10^{-7}$ тор в камере плазменного источника и $1 \cdot 10^{-9}$ тор в измерительной камере, количество примесей в рабочем газе (дейтерии) сократилось в 10 раз.

Разработан метод облучения экспериментальных образцов вольфрама и сплава вольфрамовых электронов высокими энергиями с использованием установки ЭХО (энергия электронов 3-5 МэВ, импульсный ток электронного пучка до 100 мА, длительность импульса 4-5 мс, частота 100 Гц, средняя мощность пучка до 1 кВт.).

Проведено облучение двух экспериментальных образцов вольфрама электронами высоких энергий.

Выполнена разработка метода насыщения экспериментальных образцов вольфрама тритием для наработки радиоактивного гелия в объеме материала. Образцы будут экспонироваться в тритии в специальном радиационно-безопасном контейнере при давлении 50 МПа и температурах до 500 С в течение 40 часов. После этого образцы с содержащимся в них тритием будут выдержаны в течение нескольких месяцев, чтобы часть трития успела распасться и образовать радиоактивный гелий. Затем тритий будет удален из образцов путем прогрева, гелий же останется в образцах.

Выполнена разработка программы и методики экспериментальных исследований.

Планируемые к использованию 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 очистки поверхности образца, точность и минимальные значения измеряемых потоков, остаточный вакуум) занимает уникальное положение. Установка ЭХО для облучения образцов электронами с энергией до 5 МэВ при её компактности и простоте эксплуатации (импульсный ток электронного пучка до 100 мА, длительность импульса 4-5 мс, частота 100 Гц) позволяет получать рекордные значения смещений на атом в исследуемых образцах для проведения исследований накопления изотопов водорода в поврежденных образцах. Метод «трیتیевого трюка» для наработки радиоактивного гелия в обращенных к плазме функциональных материалах термоядерных реакторов для исследования влияния гелия на накопление ранее не применялся.