

О.С. МЕДВЕДЕВ<sup>1,2,3\*</sup>, А.А. БЕЛОКУР<sup>1</sup>, И.А. АНДРЕЕВ<sup>1</sup>,  
А.М. ДМИТРИЕВ<sup>1</sup>, Д.И. ЕЛЕЦ<sup>1,2,3</sup>, В.Р. МЕЛЬНИКОВА<sup>1</sup>,  
А.Г. РАЗДОБАРИН<sup>1</sup>, Л.А. СНИГИРЕВ<sup>1</sup>, И.Е. ГАБИС<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург

<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва

<sup>3</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия

\* o.medvedev@mail.ioffe.ru

## **IN-SITU И EX-SITU ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ НАКОПЛЕНИЯ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА В БОРСОДЕРЖАЩИХ ПОКРЫТИЯХ.**

Замена бериллиевой первой стенки в токамаке ITER на вольфрамую в значительной степени актуализировало работы по исследованию борсодержащих покрытий, которые необходимо наносить и возобновлять для минимизации попадания примеси вольфрама в рабочую плазму. Борирование первой стенки – это стандартный метод кондиционирования стенок токамака, который был предложен в 1980-х годах для снижения излучения кислорода в случае графитовой облицовки [1]. На токамаке AUG с полностью вольфрамовой первой стенкой было показано, что борирование эффективно снижает излучение W в плазменных разрядах [2]. Борсодержащие покрытия активно вовлечены в процессы эрозии элементов первой стенки, в частности, в процессы накопления и рециклинга топлива [3]. Поэтому одной из задач перед научным сообществом стоит исследование особенностей накопления изотопов водорода в борсодержащих покрытиях in-vacuo методами для получения релевантных данных для токамаков.

В настоящей работе рассмотрено применение термодесорбционной спектроскопии с лазерным нагревом (Laser Heating Thermal Desorption Spectroscopy) для выявления особенностей накопления дейтерия в борсодержащих покрытиях без контакта (in-situ) и при контакте (ex-situ) покрытий с атмосферным воздухом. Данный метод диагностики накопления изотопов водорода интегрирован в вакуумный стенд BORIS (BORon Research Integrated System) в ФТИ им. Иоффе. В данном стенде реализовано магнетронное напыление борсодержащих плёнок, возможность их экспозиции в дейтериевой плазме, а также осаждение боруглеродных плёнок в гелиевом разряде в парах карборана. Стенд оснащен системой манипуляторов, позволяющих осуществлять перемещение образцов без контакта с атмосферным воздухом между камерами напыления, экспозиции и диагностики.

В качестве исследуемых образцов использовались 100 нм плёнки

напылённые магнетроном из чистой мишени бора и карбида бора на подложку из нержавеющей стали. Насыщение плёнок дейтерием проводилось в сурфатроне при давлении дейтерия 2 Па в течении 15 минут. После чего образцы для *in-situ* измерений переносились в диагностическую камеру системой манипуляторов. В случае образцов *ex-situ*, плёнки бора и боруглерода после насыщения дейтерием выносились на атмосферу на 15 минут, после чего манипуляторами помещались в диагностическую камеру.

Метод LH-TDS включает в себя три ключевых компонента: источник нагрева, анализатор остаточных газов и измеритель температуры. Нагрев исследуемого образца осуществлялся лазером (IPG YLR-2000-U-R, 1070 нм, 2000 кВт) с постепенным увеличением длительности импульса от 70 мс до 700 мс для сохранения скорости нагрева  $\approx 1$  К/с. В качестве анализатора остаточных газов использовался квадрупольный масс-спектрометр (QMS, Extorr XT300M) для фиксации временной зависимости 2, 3, 4, 18 и 40 масс. Контроль температуры осуществлялся дистанционно двух длинноволновым пирометром (3,3 мкм и 4,2 мкм) через вакуумное окно  $\text{BaF}_2$ .

На рис. 1 представлены LH-TDS спектры 4-ой и 18-ой масс для плёнок бора и бор-углерода. Левая ось ординат соответствует QMS сигналу, правая ось ординат – измеряемой температуре, по оси абсцисс отложено время. *In-situ* спектры представлены черной сплошной линией, *ex-situ* – красной пунктирной линией, светло серая кривая – температура. В случае плёнок бора (рис. 1 (а)) для 4-ой массы наблюдаются пики 500-600 К, 750 К и 850 К, 1000 К. Химические связи дейтерия с бором (B-D-B, B-D) формируют низкотемпературную часть ТДС-спектра в области 400-700 К, в то время как связи дейтерия с примесями (кислородом и углеродом) находятся в высокотемпературной области B-O-D (800-850 К), B-C-D (900-1000 К). Для *in-situ* измерений (см. рис. 1. (а)) можно отметить, что амплитуда пиков ТДС спектра 4-ой массы значительно выше амплитуды *ex-situ* измерений во всём диапазоне температур, но все особенности спектра сохраняются. Результат демонстрирует активный выход дейтерия из плёнок бора при взаимодействии с атмосферным воздухом, и интегральное снижение содержания дейтерия составляет  $\sim 35\%$  от общего накопленного дейтерия в плёнках бора. Также стоит отметить значительный рост 18-ой массы, соответствующий воде из атмосферного воздуха, (рис. 1 (а) нижний график) при контакте плёнки бора с воздухом.

Аналогичный эксперимент был проведён для бор-углеродных плёнок (см. рис. 1 (б)). В случае *in-situ* измерений наблюдается небольшое преобладание дейтерия в низкотемпературной области 500 К, пика на 700 К и

высокотемпературного пика около 1000 К. Однако основной пик десорбции дейтерия в области 800-900 К остается аналогичным по амплитуде сигнала. В случае плёнок бор-углерода снижение интегрального количества дейтерия при контакте с атмосферным воздухом составляет ~5%. Сигнал 18-ой массы ведет себя аналогично чистым плёнкам бора, что свидетельствует о высоких геттерных свойствах борсодержащих покрытий. Более детальное описание эксперимента и результатов будет представлено в докладе.

Полученные результаты демонстрируют, что анализ результатов, полученных *ex-situ* методами, для борсодержащих плёнок требует определённых допущений с точки зрения захвата изотопов водорода и прочих примесей, так как значительная часть из может десорбироваться или быть подвержена изотопному обмену при контакте с атмосферным воздухом. Геттерные свойства борсодержащих плёнок применительно к термоядерным установкам побуждают использовать *in-vacuo* и *in-situ* методы для анализа механизмов захвата и количественных оценок содержания изотопов водорода.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-12-00360-П, <https://rscf.ru/project/22-12-00360/>.

## **Литература**

- [1] J. Winter, et. al., J. Nucl. Mater. 162, (1989) 713–723
- [2] V. Rohde, et. al., Nuclear Materials and Energy 45, (2025) 102036
- [3] N.N. Bakharev, et. al., Phys. Plasmas 32, (2025) 112506