

А.Г. ПОСКАКАЛОВ^{1,2}, Н.С. КЛИМОВ^{1,2}, Ю.М. ГАСПАРЯН¹, Д.В.
КОВАЛЕНКО², О.В. ОГОРОДНИКОВА¹, В.С. ЕФИМОВ¹

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва
²Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт
инновационных и термоядерных исследований, Троицк, Москва

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАКОПЛЕНИЯ ДЕЙТЕРИЯ ПРИ ИМПУЛЬСНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ НАГРУЗКАХ ХАРАКТЕРНЫХ ДЛЯ ИТЭР

В Международном термоядерном реакторе ИТЭР в качестве обращенного к плазме материала будет использоваться вольфрам (W), из которого будет изготовлено защитное покрытие диверторных пластин. Тепловые нагрузки на пластины дивертора в токамаке масштаба ИТЭР в стационарной стадии DT-разряда будут достигать ~ 10 МВт/м², приводя к повышению температуры пластин в среднем до 1400 К; в срывах и ЭЛМах импульсные кратковременные нагрузки (~ 1 мс) на диверторные пластины будут достигать величины 0,6 – 3,5 ГВт/м², что будет вызывать периодическое повышение температуры, сопоставимой с температурой плавления материала [1].

В силу кратковременности импульсных событий ранее предполагалось незначительное влияние данных процессов на общее накопление дейтерия (D) в материалах первой стенки. Однако в работах [2, 3] установлено, что данное утверждение требует детального изучения.

Ранее на установке КСПУ-Т нами исследовались закономерности захвата D в W во время облучения импульсными потоками плазмы [3]. Согласно данным термодесорбционного анализа вольфрамовых образцов, облученных водородной плазмой, установлено, что имеет место захват дейтерия в поверхностном слое вольфрама. Для образцов вольфрама, у которых происходило плавление поверхности во время облучения, количество дейтерия, выходящего с единицы поверхности в результате термодесорбции, находится на уровне $(3 - 4) \times 10^{16}$ частиц/см², и на порядок превосходит соответствующие значения, полученное для образцов, на которых следы плавления отсутствовали $\sim 1 \times 10^{15}$ частиц/см². С помощью анализа ядерных реакций (NRA) исследовано накопление D в первых 7 мкм образцов, облученных плазмой с тепловой нагрузкой ниже и выше порога плавления вольфрама. Эти данные показали, что у поверхности общее накопление находится на уровне $\sim 10^{11}$ частиц/см², что указывает на значительное накопление D в глубине W.

В настоящей работе для объяснения диффузионных процессов, происходящих во время импульсных плазменных нагрузок на поверхность W и применение их к расчетам импульса токамака ITER, было проведено моделирование с помощью расчетной программы TMAP7, которая позволяет моделировать коллективное движение частиц в твердом теле на базе решения однородного уравнения диффузии. Основные параметры модели были следующими: образец вольфрама толщиной 2 мм, теплопроводность и теплоемкость, которого меняются в зависимости от температуры согласно [4], облучается импульсом трапецевидной формы длительностью на полувысоте около 0,8 мс, потоком частиц 7.5×10^{26} D/(м²с) с энергией 5 эВ, тепловая нагрузка варьировалась от 0,4 до 1,4 МДж/м² и была ниже порога плавления вольфрама, для упрощения расчетов. Время выдержки образца при комнатной температуре после облучения и остывания составляло 10⁴ с. Для диффузии D использовалась модель Фраунфельдера. Коэффициент рекомбинации был взят по модели Пика и Зонненберга, в которой теплота растворения равнялась 1,04 эВ, а энергия активации хемосорбции варьировалась в диапазоне (0 - 1) эВ.

Реалистичная динамика температуры важна для точного моделирования диффузионных процессов. Нами была предварительно проведена калориметрия, показывающая количество теплоты, поглощённой образцом, и изменение температуры обратной стороны образца в фазе охлаждения с разрешением в 1 сек. Полученные результаты удалось внести в код и получить реалистичную динамику температуры.

Образец, облученный импульсным потоком плазмы с тепловой нагрузкой 0,7 МДж/м², был наиболее хорошо изучен, поэтому большую часть расчетного анализа мы проводили именно для этого случая. Выбор концентрации дефектов был основан на данных NRA. Проведено моделирование с использованием различной концентрацией в диапазоне 10⁻⁵ – 10⁻² ат.% и энергией ловушек 1,0 эВ и 1,5 эВ, равномерно распределенных по всей глубине образца. При использовании данного распределения наилучшее согласие с экспериментом получено в случае 1,5 эВ, что характерно для вакансий в W и при концентрации ловушек 10⁻⁵ ат.%. На рисунке 1 (слева) продемонстрированы результаты экспериментально и расчетного ТДС анализа для образца, облученного импульсным потоком D плазмы с тепловой нагрузкой 0,7 МДж/м². Экспериментальный спектр имеет два пика, что может свидетельствовать о более сложном распределении ловушек, чем мы предполагаем в нашей работе. Эта неравномерность может быть связана с рекристаллизацией поверхности во время облучения и, соответственно, с отжигом дефектов.

Свободным параметром в расчетах является коэффициент рекомбинации. При низкотемпературном облучении влияние данного параметра может быть несущественным, но при высоких температурах, согласно модели Пика и Зонненберга, эффект может быть велик. На рисунке 1 (справа) представлены экспериментальные и расчетные (для случаев энергии активации хемосорбции 0 эВ и 0,93 эВ) зависимости накопления D в W во время импульсных плазменных нагрузок. Можно увидеть гораздо лучшее согласование с экспериментом в случае, где использовался ненулевой поверхностный барьер.

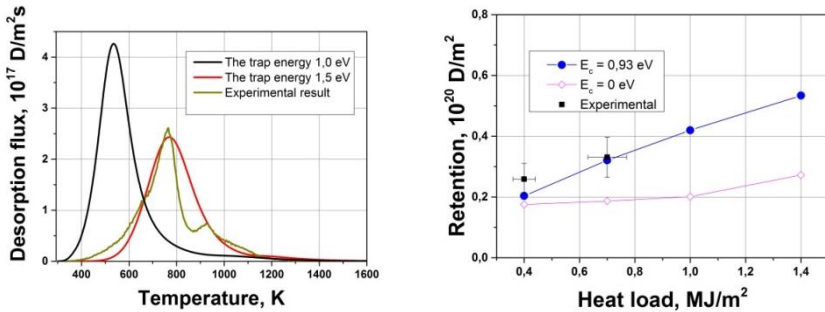


Рисунок 1. Слева - сравнение экспериментальных и расчетных данных ТДС для тепловой нагрузки $0,7 \text{ МДж}/\text{м}^2$ (энергии ловушек 1,0 эВ и 1,5 эВ). Справа - расчетное и экспериментальное накопление D в W после воздействия одним импульсом D плазмы.

Таким образом, были найдены параметры расчетов, которые удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными. Полученные параметры модели были применены для моделирования импульса в токамаке ИТЕР. В расчетной модели был взят W толщиной 6 мм, который облучался при следующих параметрах плазмы: тепловой поток $0,5 \times 10^7 \text{ Вт}/\text{м}^2$ и поток частиц $1 \times 10^{22} \text{ D}/\text{м}^2\text{с}$ в стационарном режиме, в импульсном режиме тепловой поток $1,8 \times 10^9 \text{ Вт}/\text{м}^2$ и поток частиц $7,5 \times 10^{26} \text{ D}/\text{м}^2\text{с}$. Охлаждение, поддерживающее обратную сторону W при температуре 393 К, было принято во внимание в данной работе. Частота импульсных событий бралась 0,1 Гц и 1 Гц. Созданные условия позволили получить температуру на поверхности 600 К во время стационарного облучения и повышение до 3600 К во время импульсных плазменных нагрузок.

Результаты моделирования накопления D в зависимости от частоты импульсных событий за 100-секундный цикл работы токамака ИТЭР представлен на рисунке 2.

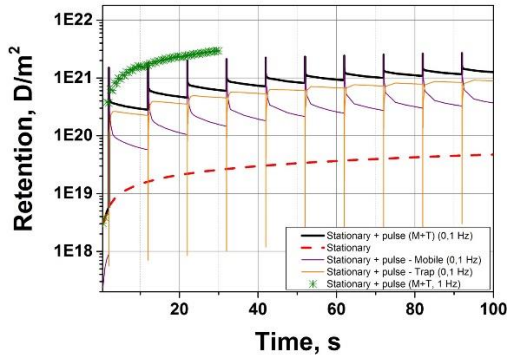


Рисунок 2. Результаты моделирование импульса токамака ИТЭР при варьировании частоты импульсных плазменных событий (0 Гц, 0,1 Гц, 1 Гц)

Наблюдается сильное влияние импульсных событий и их частоты на накопление D, которое приводит к его увеличению на полтора порядка в случае частоты ЭЛИМов 0,1 Гц и еще на порядок при частоте 1 Гц.

Литература:

- [1] D.V. Kovalenko, et al. Behavior of divertor and first wall armour materials at plasma heat fluxes relevant to ITER ELMs and disruptions. // (2017) Nuclear Materials and Energy, 12, pp. 156-163.
- [2] O.V. Ogorodnikova, et. al. D and He retention in W with and without He-induced W “fuzz” after irradiation with pulsed high-temperature D-plasma. Journal of nuclear materials
- [3] А.Г. Посакалов. Изменение структуры приповерхностного слоя вольфрама и накопление дейтерия при импульсных плазменных нагрузках. "ВАНТ. Термоядерный синтез" (Том 41 Выпуск 1 2018 г.);
- [4] ITER Vacuum Handbook