

С.А. КРАТ, Ю.М. ГАСПАРЯН, А.А. ПИСАРЕВ, И. БЫКОВ¹,
M. MAYER², G. DE SAINT AUBIN², M. BALDEN², C. LUNGU³,
A. WIDDOWSON⁴, JET-EFDA CONTRIBUTORS

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

¹*Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, Sweden*

²*Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, Garching, Germany*

³*NILPRP, Association EURATOM-MEdC, Bucharest, Romania*

⁴*Culham Science Centre, EURATOM/UKAEA – Fusion Association, Great Britain*

СРАВНЕНИЕ ЭРОЗИИ И ОСАЖДЕНИИ НА ВНУТРЕННЕЙ СТЕНКЕ ЖЕТ С ИТЭР-ПОДОБНОЙ И УГЛЕРОДНОЙ СТЕНКАМИ

Эрозия материалов обращённых к плазме элементов термоядерных установок – важный вопрос с точки зрения времени жизни этих установок. В рамках проекта ИТЭР планируется использование бериллия в качестве материала первой стенки токамака. В 2010^{ом} году на токамака JET (Joint European Thorus) была произведена замена внутренней стенки с углеродной на ИТЭР-подобную, составленную из бериллия из вольфрама. В этой работе представлены результаты измерений эрозии внутренней стенки токамака JET за экспериментальную кампанию 2011-2012 годов в сравнении с данными для кампаний 2001-2004 и 2005-2009 годов.

Измерения проводились при помощи образцов-вкладышей. Образцы устанавливались в тайлы внутренней стенки заподлицо. Образцы были расположены в различных октантах, вблизи внутренней средней плоскости (8ой тайл, считая сверху), а также, в 4ом октанте, распределены по вертикали. В кампаниях 2001-2004 и 2005-2009 образцы были расположены в 1^{ом}, 3^{см}, 4^{ом}, 5^{ом}, 6^{ом}, 8^{ом} октантах. В кампании 2011-2012 года образец был установлен не во 3^{см}, а в 2^{ом} октанте. Во всех кампаниях образцы, распределённые по вертикали, были установлены в 4^{ом} октанте, во 2ом, 5ом, 8ом и 11ом тайлах, считая сверху.

Образцы представляли собой тонкие покрытия на различных подложках. В кампании 2001-2004 годов были использованы образцы с вольфрамовым покрытием. В кампании 2005-2009 были использованы образцы, наполовину состоящие из бериллия на медной подложке и наполовину из углерода с вольфрамовой прослойкой. В кампании 2011-2012 годов были использованы образцы, сделанные из сплава Инконель, наполовину покрытые бериллием и наполовину углеродом.

Толщины покрытий измерялись до помещения образцов в токамак и после завершения экспериментальной кампании при помощи метода

ядерных реакций. Сравнение полученных толщин позволяло определить интегральную эрозию образца за период кампании. Анализ проводился на ускорителе заряженных частиц TANDEM в Институте физики плазмы им. Макса Планка (Гархинг, Германия). Образцы 2001-2004 годов были анализированы при помощи 1,5 МэВ 4He^+ ионов. Образцы 2005-2009 годов были проанализированы при помощи 1,5 МэВ протонов, а также 3 МэВ протонов для углеродных частей образцов. Образцы 2011-2012 годов были проанализированы при помощи 1,6 МэВ протонов.

По результатам проедённых измерений и с учётом статистики разрядов для всех рассматриваемых кампаний были составлены распределения эрозии материалов в тороидальном и полоидальном направлениях (рис. 1)

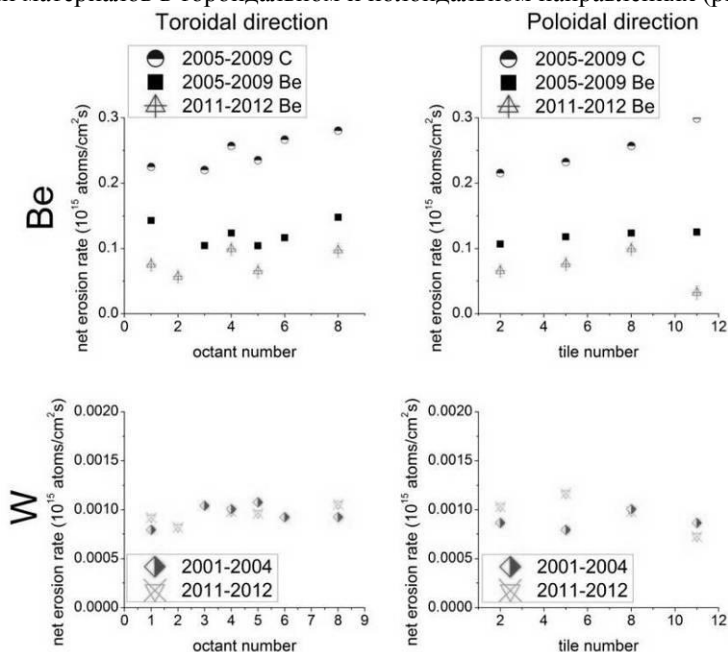


Рис. 1: распределения скоростей эрозии образцов с внутренней стенки для разных кампаний. Левый столбец – тороидальное распределение, правый – полоидальное. Верхняя строка – бериллиевые образцы, нижняя строка – вольфрамовые.

Эрозия вольфрама мало различалась между кампаниями, как по скорости (в среднем $8,4 \times 10^{11}$ атомов/(см²×с) для 2001-2004 годов и $9,4 \times 10^{11}$ атомов/(см²×с) для 2011-2012 годов), так и по распределениям в полои-

дальном и тороидальном направлениях. В целом, эрозия вольфрама происходит равномерно в обоих направлениях.

В отличие от вольфрама, замена первой стенки на ИТЭР-подобную оказала существенное влияние на эрозию бериллия с неё. Средняя скорость эрозии бериллия в кампании 2011-2012 ($0,54 \times 10^{14}$ атомов/(см²×с)) составляла приблизительно половину скорости эрозии бериллия в кампании 2005-2009 ($1,2 \times 10^{14}$ атомов/(см²×с)) и была в 4,5 раз меньше скорости эрозии углерода ($2,4 \times 10^{14}$ атомов/(см²×с)) в кампании 2005-2009 годов.

Тороидальное распределение эрозии было схожим в обеих кампаниях, с небольшими максимумами в 1^{ом} и 4^{ом} октантах, вероятно связанными с инжекторами нейтральных частиц, расположенными в них.

Полоидальное распределение скоростей эрозии бериллия различалось между кампаниями. В кампании 2005-2009 оно было равномерным, в то время как в кампании 2011-2012 оно имело максимум вблизи внутренней средней плоскости.

Использованный метод подсчёта скорости эрозии позволяет определять только интегральную величину полной эрозии за кампанию. Для её уменьшения возможны две причины, так как она представляет собой разницу между количеством распыленного материала и количеством переосаждённого материала.

Скорость распыления могла быть меньше для кампании 2011-2012 годов. Так как эрозия вольфрама, переосаждение для которого должно слабо влиять на суммарную эрозию в обеих кампаниях, происходила приблизительно одинаково для ИТЭР-подобной и для углеродной стенок, маловероятно, что скорость распыления бериллия была меньше в кампании 2011-2012, чем в кампании 2005-2009.

Во время кампании 2011-2012 большая часть внутренней стенки была покрыта бериллием, в отличие от кампании 2005-2009, в которой бериллий отсутствовал на внутренней стенке за исключением отдельных маленьких образцов. Из-за этого вероятность переосаждения бериллия на образцы была гораздо выше в кампании 2011-2012 годов, что, вероятно, и приводило к уменьшению скорости эрозии.

В целом можно сказать, что смена первой стенки с углеродной на ИТЭР-подобную цельнометаллическую привела к уменьшению скорости эрозии внутренней стенки приблизительно в 4-5 раз.