

УДК 621.039.665

АНАЛИЗ ТРАНСМУТАЦИИ МАТЕРИАЛОВ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ЗЕРКАЛ В ИТЭР

*К.Ю. Вуколов, Д.В. Марковский, И.И. Орловский (НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия),
Р.А. Форрест (UKAEA/EURATOM Fusion Association, Culham Science Centre, Abingdon, Oxfordshire,
OX14 3 DB, UK)*

В составе оптических диагностик термоядерного реактора ИТЭР планируется использование металлических зеркал для передачи излучения из плазмы к детекторам. В процессе эксплуатации диагностические зеркала будут подвергаться значительному нейтронному облучению, способному вызывать изменение элементного состава (трансмутацию) материала зеркал. В работе представлены результаты расчёта скорости трансмутации для наиболее вероятных материалов диагностических зеркал ИТЭР и оценено её влияние на оптические свойства зеркал. Кроме того, продемонстрирована несостоятельность оценки скорости трансмутации материалов в ИТЭР на основе экспериментальных результатов, полученных в ядерном реакторе.

Ключевые слова: трансмутация, первое зеркало, ИТЭР.

TRANSMUTATION ANALYSIS OF THE MATERIALS FOR DIAGNOSTIC MIRRORS IN ITER. K.Yu. VUKOLOV, D.V. MARKOVSKIY, I.I. ORLOVSKIY, R.A. FORREST. Optical diagnostics in ITER fusion reactor will contain metal mirrors for light transfer from the main plasma to detectors. During operation diagnostic mirrors will be subjected to significant neutron irradiation which can produce transmutation of elements of mirror's material. In the paper calculated transmutation rates of the most probable materials for diagnostic mirrors in ITER are presented. The effect of transmutation on optical properties of the mirrors is discussed. Also, inconsistency of transmutation rate estimation for ITER materials basing on experimental data acquired in nuclear reactor is demonstrated.

Keywords: transmutation, first mirror, ITER.

ВВЕДЕНИЕ

Размещаемые внутри вакуумной камеры элементы оптических диагностик ИТЭР будут эксплуатироваться при значительных потоках нейтронов, гамма-излучения и испытывать существенные тепловые нагрузки. В особенно жёстких условиях окажется первое зеркало, непосредственно собирающее излучение из плазмы [1]. Его поверхность может быть подвержена эрозии под воздействием атомов перезарядки, а также осаждению загрязнений [2] в зависимости от локальных условий вблизи него (потоки и энергия нейтронов, температура зеркала, состав и парциальное давление газа). Поток нейтронов на первое зеркало диагностик может достигать 10^{14} н/(см²·с) с значительным вкладом нейтронов 14 МэВ. Режим работы ИТЭР предусматривает выполнение около 1000 импульсов в год длительностью 500 с каждый. Таким образом, флюенс нейтронов на первом зеркале за 5 лет работы в D—T-режиме составит примерно 10^{21} н/см². Гарантированно выдержать совокупное воздействие указанных факторов может металлическое зеркало.

Условия эксплуатации первого зеркала будут различными для разных диагностик, что подразумевает и различный подход к выбору его материала. Для диагностик, поставляемых в ИТЭР российской стороной, а именно спектроскопии водородных линий и активной спектроскопии, первое зеркало планируется изготавливать из молибдена. При выборе материала для первого зеркала, помимо очевидных требований, таких, как достаточные химическая стойкость, теплопроводность, коэффициент отражения, следует также учитывать и допустимость использования самого материала под воздействием нейтронного облучения. Одним из критериев допустимости использования материала является его устойчивость к трансмутации, т.е. превращению части атомов исходного материала в атомы с другим атомным номером под действием нейтронов. Значительное изменение элементного состава материала зеркала может привести к изменению его характеристик и, в частности, коэффициента отражения. Расчёт изменения элементного состава некоторых металлов в результате трансмутации в условиях ИТЭР рассматривается в статье с точки зрения возможного влияния на характеристики зеркал.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ РАСЧЁТА ТРАНСМУТАЦИИ

В качестве материала для диагностических зеркал ИТЭР рассматривались следующие металлы: медь, молибден, вольфрам, родий и золото. Исходный изотопный состав принят соответствующим есте-

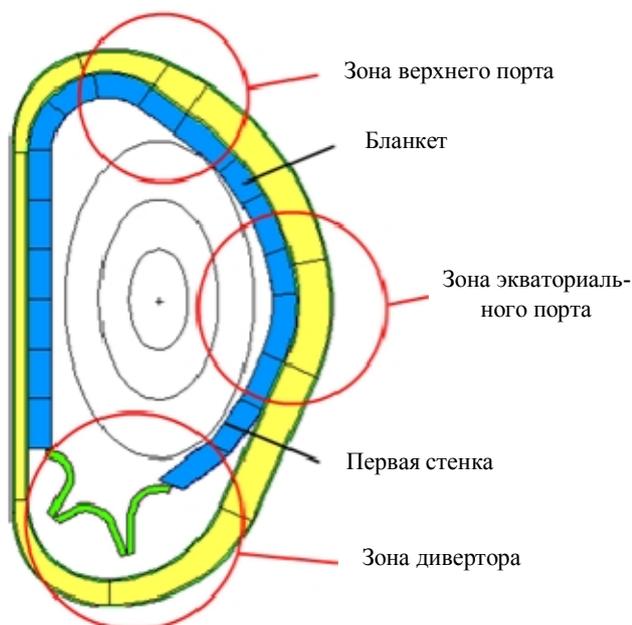


Рис. 1. Модель ИТЭР для расчёта спектров нейтронов в бланкете и на первой стенке ИТЭР

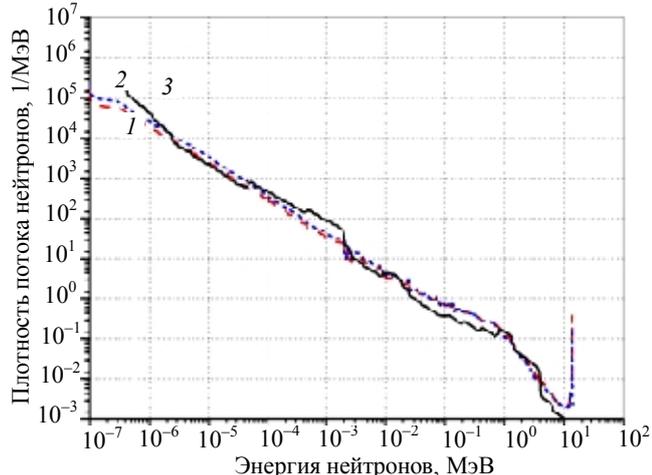


Рис. 2. Нормированные на единицу спектры нейтронов на первой стенке в районе верхнего порта (1), в бланкете дивертора ИТЭР (2), в активной зоне ядерного реактора (3)

ственному, природному составу. В расчётах предполагалось, что зеркала представляют собой однородные диски, помещённые в прямой видимости плазмы в верхнем и экваториальных портах, а также в диверторной зоне.

Условия облучения зеркал в ИТЭР определяются тремя характеристиками: спектром нейтронов, интенсивностью полного потока нейтронов во времени и длительностью облучения (флюенсом). Спектры нейтронов рассчитывались по программе MCNP для специально разработанной упрощённой расчётной модели ИТЭР, показанной на рис. 1. В тороидальном обходе модель представляла собой угловой элемент симметрии с не зависящими от тороидального угла свойствами. В поперечном сечении модель включала первую стенку, бланкет и вакуумный корпус — основные фрагменты реактора, ответственные за формирование спектра нейтронов на первой стенке и вблизи неё, где возможно размещение зеркал. Расчётный режим предполагал облучение в стационарном потоке нейтронов 10^{14} н/(см²·с) до флюенса 10^{22} н/см².

Расчёты показали, что спектры нейтронов в указанных местах почти не отличаются друг от друга. Спектры практически не зависят от положения при полоидальном обходе, но в бланкете и диверторе несколько мягче, чем на первой стенке. На рис. 2 приведены нормированные на единицу спектры нейтронов на первой стенке в районе верхнего порта, в бланкете в районе дивертора, а также, для сравнения, нормированный на единицу спектр нейтронов в канале активной зоны водо-водяного ядерного реактора.

МЕТОД РАСЧЁТА ТРАНСМУТАЦИИ

Расчёты проводились с использованием европейской системы расчёта активации EASY-2001 [3—6], включающей программу FISPACT-2001 для расчёта радионуклидного состава в различные моменты времени после облучения нейтронами, а также библиотеки активационных сечений и данных о распадах ядер.

Программа FISPACT решает систему дифференциальных уравнений, описывающих количество различных нуклидов после облучения данного материала в нейтронном поле. В общем случае система дифференциальных уравнений имеет вид

$$\frac{dN_i}{dt} = -N_i(\lambda_i + \sigma_i\phi) + \sum_{j \neq i} N_j(\lambda_{ij} + \sigma_{ij}\phi) + S_i;$$

$$S_i = \sum_k N_k \sigma_k^j \phi Y_{ik},$$

где N_i — количество атомов нуклида i в момент времени t ; λ_i — постоянная распада нуклида i , с⁻¹; λ_{ij} — постоянная распада нуклида j в нуклид i , с⁻¹; σ_i — полное сечение реакции на нуклиде i , см²; σ_{ij} — сечение реакции на нуклиде j с образованием нуклида i , см²; σ_k^j — сечение деления нуклида k с образованием

ем нуклида j , см^2 ; ϕ — поток нейтронов, $\text{н}\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$; S_i — полный выход нуклида i в реакциях деления; Y_{ik} — выход нуклида i в реакции деления на нуклиде k .

Система уравнений решается методом Сайдела [4], представляющим собой разновидность метода Эйлера и использующим приближение первого порядка в разложении экспоненциальной функции на временном шаге в ряд Тейлора.

Взаимодействия с заряженными частицами, порождёнными предшествующими реакциями с нейтронами, приближенно учитываются по методу, описанному в [7].

Трансмутация, т.е. относительная суммарная убыль изотопов химического элемента в результате облучения нейтронами в разные моменты сценария, оценивалась по формуле

$$t = 1 - N/N_0,$$

где N_0 — стартовое количество атомов материала; N — суммарное количество всех имеющихся в данный момент изотопов элемента — исходных и накопленных, в том числе радиоактивных.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЁТА

Проведённые расчёты показали, что с точностью до нескольких относительных процентов скорость трансмутации всех исследованных материалов при заданном потоке и флюенсе нейтронов не зависит от положения точки облучения (в выбранных местах — см. рис. 1) как по глубине, так и по поперечному обходу. Этот результат объясняется примерно одинаковыми спектрами нейтронов во всех расчётных точках.

Для большинства рассмотренных материалов доминирующим каналом трансмутации является радиационный захват нейтрона, с которым в некоторых случаях конкурируют реакции (n, p) и (n, t) . Полученные зависимости трансмутации рассмотренных металлов от флюенса нейтронов приведены на рис. 3.

Из полученных данных видно, что при облучении до флюенса 10^{21} н/см² (примерно 5 лет эксплуатации ИТЭР в D—T-режиме) уровень трансмутации для всех металлов, кроме золота (3%), составляет менее 1,5%. Для молибдена и меди эффект трансмутации практически не наблюдается, а это значит, что для этих металлов в условиях ИТЭР она не будет влиять на характеристики зеркал из молибдена и меди.

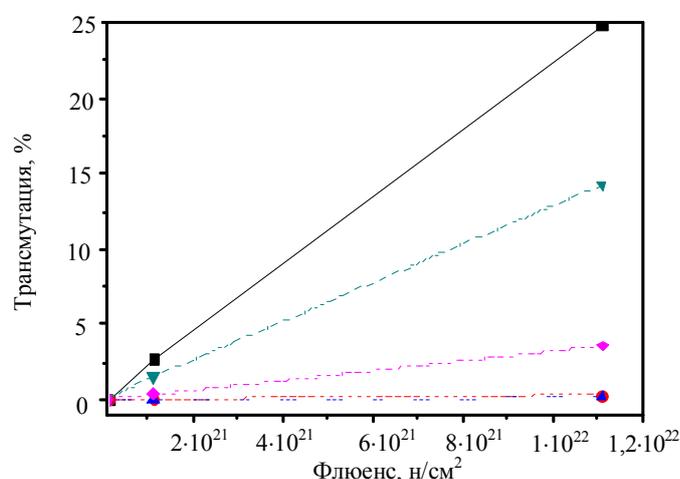


Рис. 3. Зависимость трансмутации для различных металлов от флюенса нейтронов: ■ — Au; ● — Cu; ▲ — Mo; ▼ — Rh; ◆ — W

ДИСКУССИЯ

При значительном уровне трансмутации, наблюдаемом, например, у золота, ответ на вопрос о её влиянии на отражение от зеркала достаточно сложен. Как известно, в видимом диапазоне отражение во многом определяется структурными особенностями поверхностного слоя, поэтому теоретическое предсказание оптических характеристик зеркал весьма затруднено [8]. Исследования влияния чистоты материала на оптические характеристики зеркала проводятся в основном экспериментальным путём. Например, в работе [9] обнаружено, что коэффициент отражения от зеркального покрытия из Al с чистотой 99% примерно на 2% ниже, чем коэффициент отражения от покрытия из Al с чистотой 99,99%. По аналогии можно предположить, что уровень трансмутации в 1,5% не вызовет уменьшения коэффициента отражения более, чем на 2%, а это не должно помешать нормальному функционированию диагностик ИТЭР.

Достаточно заметные изменения в изотопном составе могут проявиться за более длительный срок (примерно за 20 лет) на зеркалах из золота и родия, однако за такое время намного более существенно могут сказаться уже упомянутые распыление поверхностного слоя потоками нейтронов или загрязнение

поверхности за счёт осаждения материала внутрикамерных материалов. Эти проблемы могут решаться очисткой поверхности за счёт распыления в плазменных разрядах или заменой зеркала.

Следует отметить, что экспериментально проблема трансмутации материалов зеркал в ИТЭР может решаться только с учётом специфики спектра нейтронов в термоядерном реакторе. Этот спектр сильно отличается от спектра ядерного реактора не только в области низких энергий, но и при энергии нейтронов выше 1 МэВ (см. рис. 2). Использование результатов при облучении материалов нейтронами в ядерном реакторе с целью предсказания поведения этих материалов в ИТЭР возможно лишь при тщательном учёте различия

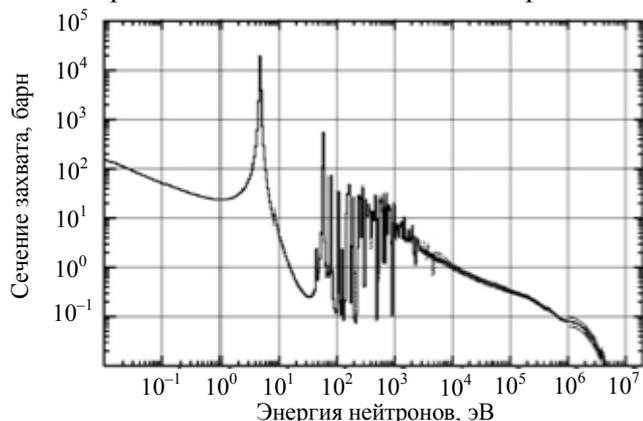


Рис. 4. Зависимость сечения захвата нейтронов золотом от энергии (взято из [11])

спектров нейтронов, иначе неизбежны ошибки. Например, при облучении образцов золота в ядерном реакторе JMTR [10] значительная его часть превратилась в ртуть, и на этом основании был сделан вывод о проблематичности использования золота в конструкции болометров и других элементов вблизи первой стенки ИТЭР. На самом деле следует учитывать, что у золота резкий подъём сечений захвата нейтрона в тепловой группе и области резонансов (10^{-4} — 10^{-3} МэВ) (рис. 4) совпадает с значительным (в несколько раз) превышением потоков нейтронов в этих диапазонах энергии в ядерном реакторе по сравнению с термоядерным.

Как было показано, результат для термоядерного спектра нейтронов на первой стенке в ИТЭР будет совсем другой, особенно из-за различий в тепловой группе нейтронов. Очевидно, что игнорирование различия спектров при прямом переносе результатов облучения в ядерном реакторе для равного флюенса неизбежно приводит к существенному завышению эффекта трансмутации золота в реакторе ИТЭР.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ трансмутации металлов при облучении их нейтронами вблизи первой стенки ИТЭР позволяет сделать вывод о том, что в пределах флюенса 10^{21} н/см², соответствующего примерно 5 годам эксплуатации установки в D—T-режиме, ни на одном из рассмотренных материалов зеркал трансмутация не превысит 2%. Данный уровень трансмутации, по-видимому, не окажет существенного влияния на оптические свойства зеркал.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Орлинский Д.В., Вуколов К.Ю., Войцены В.С. Имитационные исследования поведения зеркал диагностических систем экспериментального термоядерного реактора. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2005, вып. 3, с. 3—50.
2. Вуколов К.Ю., Мухаммедзянов Т.Р., Звонков С.Н., Свечников Н.Ю., Станкевич В.Г., Архипов И.И., Раджаратнам Д. Экспериментальное исследование осаждения углеводородных пленок на металлические зеркала. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2010, вып. 4, с. 13—19.
3. Forrest R.A., Kopecky J. The European Activation File: EAF-2001 cross section library. UKAEA FUS 451, 2001.
4. Forrest R.A. The European Activation File: EAF-2001decay data library. UKAEA FUS 452, 2001.
5. Forrest R.A. The European Activation File: EAF-2001biological, clearance and transport libraries. UKAEA FUS 453, 2001.
6. Sidell J. 'EXTRA. A digital computer program for the solution of stiff sets of ordinary value, first order differential equations. AEEW-R-799, 1972.
7. Cierjacks S. et al. Development of a novel algorithm and production of new nuclear data libraries for the treatment of sequential (x, n) reactions in fusion material activation calculations. — Fus. Techn., 1993, vol. 24, p. 277.
8. Соколов А.В. Оптические свойства металлов. — М.: Гос. Изд-во физ.-мат. лит., 1961, 151 с.
9. Андреев С.В., Губанова Л.А. Исследование оптических постоянных металлов. — В сб.: Оптические и лазерные технологии. Под ред. В.Н. Васильева. — СПб ГИТМО (ТУ), 2001, с. 76—77.
10. Nishitani T. et al. In-situ irradiation test of mica substrate bolometer at the JMTR reactor for the ITER diagnostics. — Fus. Eng. Des., 2002, vol. 63—64, p. 437—441.
11. Nakagawa T. et al. Japanese Evaluated Nuclear Data Library Version 3 Revision-2: JENDL-3.2'. — J. Nucl. Sci. Technol., 1995, vol. 32, p. 1259.

Статья поступила в редакцию 25 января 2011 г.
Вопросы атомной науки и техники.
Сер. Термоядерный синтез, 2011, вып. 1, с. 25—28.