УДК 621.039

ОЦЕНКА СКОРОСТИ ДЕГРАДАЦИИ ВНУТРИКАМЕРНЫХ ЗЕРКАЛ ДИАГНОСТИКИ «СПЕКТРОСКОПИЯ ВОДОРОДНЫХ ЛИНИЙ» В ИТЭР

Е.Н. Андреев^{1, 2}, И.И. Орловский^{1, 2}, А.Г. Алексеев^{1, 2}, А.А. Морозов^{1, 2}¹НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия²Координационный центр «Управляемый термоядерный синтез — международные проекты», Москва, Россия

На токамаке-реакторе ИТЭР будет задействовано более 30 оптических и лазерных диагностик, использующих системы зеркал для передачи излучения. Их надёжная работа напрямую связана со скоростью деградации первого зеркала, обращённого непосредственно к плазме. Наибольшую опасность для первого зеркала представляют потоки нейтральных атомов из плазмы, в основном D, T и Be. Воздействие высокоэнергетических атомов рабочего газа может приводить к распылению поверхности зеркала, а переосаждение распылённого со стенок вакуумной камеры бериллия — к образованию на зеркале плёнки. В данной работе проводится консервативная оценка скорости деградации внутрикамерных зеркал в экваториальных каналах диагностики «Спектроскопия водородных линий». Расчёты проводились с помощью программы Zemax OpticStudio для стационарного режима работы ИТЭР. Результаты показывают, что рабочая область первого зеркала будет подвержена распылению со скоростью не более 100 нм/год, что является допустимой эрозионной нагрузкой при использовании зеркал из монокристаллического молибдена. Образование бериллиевой плёнки ожидается только на краях зеркала (вне рабочей области). Возможное загрязнение рабочей части зеркала в результате аварий или срывов плазмы может быть устранено с помощью встроенной в узел первого зеркала системы очистки зеркал. Оценка, выполненная для остальных внутрикамерных зеркал, показала, что их существенной деградации не ожидается ввиду их удалённости от плазмы.

Ключевые слова: диагностика плазмы, первое зеркало, ИТЭР.

ESTIMATION OF VACUUM MIRRORS DEGRADATION RATE FOR H-ALPHA AND VISIBLE SPECTROSCOPY IN ITER

E.N. Andreenko^{1, 2}, I.I. Orlovskiy^{1, 2}, A.G. Alekseev^{1, 2}, A.A. Morozov^{1, 2}¹NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia²International Fusion Project Coordinating Centre, Moscow, Russia

More than 30 optical and laser diagnostics installed in ITER tokamak-reactor will use mirrors for transmittance of light. Their reliable performance depends largely on the degradation rate of the first mirror, which is exposed directly to the plasma. The impact of neutral fluxes of D, T and Be from the plasma is the most critical issue for the first mirror. The flux of high-energy atoms of operation gas can produce the physical sputtering of the mirror's surface. At the same time, redeposition of Be from the first wall can contaminate the mirror surface with films. In this work, a conservative estimation of vacuum mirrors' degradation rate for the equatorial channels of H-alpha and Visible Spectroscopy is performed for stationary ITER modes with Zemax OpticStudio software. The results show that the working area of the first mirrors will be located in an erosion-dominated zone with erosion rate no more than 100 nm/year, which is acceptable for the mirrors made of single-crystal molybdenum. Formation of Be films is expected only on the edges of the mirrors outside the working area. Possible contamination of the working area due to accidents or plasma events can be eliminated by the mirror cleaning system, which will be built in the first mirror unit. Estimations made for the rest vacuum mirrors predict insignificant degradation rate due to a long distance from the plasma.

Key words: plasma diagnostics, first mirror, ITER.

DOI: 10.21517/0202-3822-2019-42-3-13-24

ВВЕДЕНИЕ

Диагностика «Спектроскопия водородных линий» (СВЛ) на установке ИТЭР располагается в экваториальных каналах № 11 и 12 (ЕРР11, ЕРР12) и предназначена для регистрации и анализа свечения возбуждённых атомов изотопов водорода (D, T) и примесей (Be, W и др.) в видимом диапазоне длин волн 450—700 нм из пристеночной области плазмы (scrape-off layer, SOL). В состав оптической системы СВЛ входят четыре зеркала для вывода излучения плазмы из вакуумной части установки. Первые два зеркала (сферическое M1 и плоское M2) объединены в узел входного зеркала (УВЗ), два другие плоские зеркала M3 и M4 образуют перископическую систему, которая необходима для снижения радиационной нагрузки на вакуумное окно и припортовые зоны (рис. 1).

Рис. 1. Схема вакуумной части оптической системы СВЛ в канале ЕРР12: 1 — вырез в первой стенке; 2 — УВЗ; 3 — зеркало M3; 4 — зеркало M4; 5 — вакуумное окно

УВЗ крепится к защитному модулю, расположенному за диагностической первой стенкой (ДПС), при этом в защитном модуле и в ДПС сделаны конусообразные вырезы, соответствующие области наблюдения диагностики. Оптическая схема УВЗ построена по принципу камеры-обскуры, т.е. каждая точка наблюдаемого объекта передаётся не всем зеркалом М1, а только небольшой его частью. Таким образом, локальное ухудшение оптических характеристик поверхности первого зеркала может приводить к ухудшению качества соответствующих участков передаваемого изображения, что, в свою очередь, может серьёзно осложнить анализ экспериментальных данных. В частности, снижение контраста изображения оптических ловушек, расположенных на внутренней части первой стенки, не позволит эффективно выделять сигнал SOL на фоне яркого рассеянного света, излучённого в диверторной области [1].

Первое зеркало, обращённое непосредственно к плазме, будет испытывать воздействие потоков нейтральных частиц из плазмы, в результате поверхность зеркала будет подвержена как распылению высокоэнергетическими атомами D и T, так и переосаждению примесей, в основном Be, распылённых с первой стенки. Это может привести к снижению коэффициента зеркального отражения и увеличению коэффициента диффузного рассеяния, что отрицательно скажется на пропускной способности оптической системы, а также на контрасте и разрешении передаваемого изображения. Для повышения устойчивости зеркал УВЗ к распылению их отражающий слой будет изготавливаться из монокристаллического молибдена. Молибден сам по себе обладает низким коэффициентом распыления, а монокристаллическая структура обеспечивает низкую шероховатость поверхности при распылении на глубину вплоть до нескольких микрон и, как следствие, сохранение диффузного компонента коэффициента отражения на приемлемо низком уровне [2, 3].

Рис. 2. Конструкция узла входного зеркала СВЛ на ИТЭР

эффективность [4, 5], её частое применение при определённых условиях может снижать ресурс зеркал вследствие накопления дефектов в поверхностном слое, приводящего к значительному увеличению коэффициента диффузного рассеяния [6].

Для оценки времени жизни зеркала УВЗ и выработки требований к режимам работы СОЗ необходимо оценить скорость загрязнения и распыления различных участков поверхности зеркала в различных режимах эксплуатации установки. В данной работе приводится расчёт потоков нейтральных атомов D, T и Be на внутрикамерные зеркала СВЛ, а также скорость изменения профиля поверхности первого зеркала в реальной конфигурации СВЛ в каналах EPP11 и EPP12 для стационарной стадии разряда ИТЭР.

ВХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ РАСЧЁТА

В работе [7] приводится расчёт плотности потоков нейтральных атомов на первую стенку ИТЭР с учётом реальной геометрии вакуумной камеры и в предположении тороидальной симметрии плазмы.

Защита зеркал от загрязнения реализуется с помощью входного зрачка малого размера ($\varnothing < 10$ мм), существенно снижающего поступление частиц из плазмы внутрь УВЗ, а также шторки, перекрывающей его в режимах кондиционирования камеры. Кроме того, в УВЗ устанавливается система очистки зеркал (СОЗ), основанная на ионном распылении в сеточном полом катоде в разряде постоянного тока с D, He, Ne или Ar в качестве рабочего газа [4] (рис. 2). СОЗ предназначена для устранения загрязнений, возникающих на зеркалах в рабочих режимах (на стационарной стадии и при срывах разряда), а также в результате возможных протечек водяной системы охлаждения конструкций установки. Несмотря на то, что разработанный для СВЛ прототип СОЗ продемонстрировал приемлемую

На рис. 3 показаны полученные распределения плотности потоков атомов перезарядки дейтерия и трития, а также их средняя энергия по полоидальному обходу вакуумной камеры ИТЭР. Выделенные на графиках зоны соответствуют расположению верхнего (в районе отметки 10 м) и экваториального (в районе отметки 15 м) порта. Приведённые данные рассчитаны для стационарной стадии разряда в различных режимах работы установки: LD, MD и HD — режимы с низкой, средней и высокой плотностью плазмы соответственно. В настоящей работе будут рассмотрены режимы с максимальной и минимальной плотностью потоков атомов перезарядки на входе экваториальных каналов HD и LD.

Рис. 3. Распределение плотности потоков атомов перезарядки (D и T) (а) и их средней энергии (б) по полоидальному обходу вакуумной камеры ИТЭР. Выделенные зоны соответствуют расположению верхнего (в районе отметки 10 м) и экваториального (в районе отметки 15 м) порта [7]: — LD/D; — MD/D; — HD/D; — LD/T; — MD/T; — HD/T

Кроме того, в работе [7] приведено угловое распределение скорости переосаждения бериллия вдоль экваториального порта и отмечено, что поток атомов бериллия обеспечивается, в основном, за счёт распыления соседних участков первой стенки. Используя эти данные, можно вычислить плотность потока бериллия в области расположения зрачков диагностики СВЛ в 11-м и 12-м экваториальных портах. Согласно работе [8] большая часть атомов примесей, в том числе Be, на входе в канал имеют энергию ≈ 10 эВ. Используемые значения параметров нейтральных частиц приведены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры нейтральных атомов на входе в экваториальные каналы

Канал	Режим	Энергия D и T, эВ	Плотность потока D и T, $\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$	Плотность потока Be, $\text{м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$
EPP11	HD	200	$9\cdot 10^{21}$	$2\cdot 10^{18}$
	LD	300	$2\cdot 10^{21}$	$1\cdot 10^{18}$
EPP12	HD	200	$9\cdot 10^{21}$	$8\cdot 10^{18}$
	LD	300	$2\cdot 10^{21}$	$3\cdot 10^{18}$

ПАРАМЕТРЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Ранее для оценки уровня рассеянного света в каналах диагностики СВЛ, а также для расчёта эффективности системы калибровки, в программе Zemax OpticStudio была создана модель вакуумной части диагностики [9]. В настоящей работе данная модель использовалась для оценки потоков нейтральных атомов D, T и Be на первое зеркало СВЛ. Главной целью расчётов при этом являлась консервативная оценка (оценка сверху) величины этих потоков и, как следствие, их неблагоприятного воздействия на зеркала СВЛ.

Программный пакет Zemax OpticStudio предназначен для проведения оптических расчётов, а также позволяет производить расчёт многократного рассеяния излучения методом Монте-Карло. В этой работе данный программный пакет используется для расчёта транспорта частиц вдоль оптического канала СВЛ (до первого зеркала), движение фотонов в программе моделирует движение атомов водорода и бериллия, а параметры отражения фотонов от поверхностей задаются в соответствии с законами распыления, отражения и переосаждения частиц. При таком подходе невозможно учесть столкновения частиц между собой, но если давление в диагностическом порту не превышает 0,1 Па, то рассеянием нейтральных частиц на остаточном газе можно пренебречь [10].

Дополнительно к упомянутой модели в программном пакете Zemax OpticStudio были созданы модели вырезов в ДПС, геометрия которых соответствовала актуальной модели в БД ИТЭР (ENOVIA). Вырезы представляют собой усечённую четырёхугольную пирамиду (рис. 4, а), большое основание которой обращено к вакуумной камере, в малом основании располагается входной зрачок диагностики. В ЕРР11 вырез имеет зеркальную симметрию относительно вертикальной полоидальной плоскости, так как конус

Рис. 4. УВЗ и вырез в первой стенке для ЕРР12: а — изометрическая проекция; б — вид сверху

обзора диагностики направлен перпендикулярно на первую стенку, в ЕРР12 вырез несимметричный, так как этот канал обеспечивает тангенциальный обзор (рис. 4, б). Большое основание вырезов имеет линейные размеры $\approx 150 \times 650$ и $\approx 100 \times 250$ мм, длина вырезов 750 и 400 мм, диаметр входного зрачка 7 и 10 мм для ЕРР11 и ЕРР12 соответственно. Первые зеркала в обоих каналах прямоугольные со сферической рабочей поверхностью радиусом $R = 360$ мм, линейные размеры зеркал 164×60 (ЕРР11) и 150×60 мм (ЕРР12), расстояние от зрачка до зеркала составляет 190 мм.

В расчётных моделях зеркала были заменены детекторами соответствующего размера с разрешением 90×90 пикселей, модельный изотропный источник частиц был расположен на входе в канал. Геометрия источника полностью повторяет геометрию выреза в ДПС. В каждом расчёте из источника выпускалось $\approx 4 \cdot 10^{10}$ частиц.

Для расчёта плотности потоков нейтральных атомов D, T и Be на первое зеркало диагностики СВЛ необходимо учесть несколько процессов: транспорт частиц из плазмы, включающий в себя прямопролётные и отражённые от стенок канала частицы, а также распыление бериллия со стенок оптического канала и дальнейший транспорт распылённых частиц.

Расчёты проводились в консервативном предположении что стенки выреза в ДПС полностью покрыты переосаждённым бериллием, отражения от стенок упругие, в связи с чем коэффициент распыления бериллия атомами дейтерия и трития не уменьшается после нескольких отражений частиц от стенок. Согласно результатам численных расчётов и экспериментальным данным [11] $Y_{Be} = 0,04$ для D и T энергией 200—300 эВ. Также был проведён расчёт в предположении, что бериллий осаждается в виде рыхлой плёнки с коэффициентом распыления $Y_{Be} = 0,2$. В рамках проводимых оценок коэффициент отражения от стенок оптического канала для атомов Be и D, T был задан одинаковым — $R_{Be} = R_{DT} = 0,5$. Значения коэффициентов отражения и распыления задавались не зависящими от угла падения частиц на стенку канала, при этом использовалось косинусоидальное (ламбертовское) угловое распределение отражённых и распылённых частиц. Влияние данных допущений на результаты расчётов рассматривается далее в разделе «Обсуждение».

Прямой подход к решению данной задачи трудно осуществим на практике, поскольку в кодах для оптических расчётов невозможно задать в свойствах поверхности одновременно и коэффициент отражения, и коэффициент распыления. Кроме того, если коэффициент распыления достаточно мал ($\sim 10^{-2}$), то для набора достаточной статистики необходимо задавать очень большое количество лучей ($\sim 10^{12}$), выпускаемых из источника, в результате один расчёт в Zemax может занимать до месяца.

Ввиду перечисленных ограничений расчёт был разбит на несколько этапов. На первом этапе рассчитывались траектории движения частиц, при этом моделирование в Zemax проводилось без привязки к типу частиц, а отражение от стенок канала задавалось равным 100% с ламбертовским угловым распределением. Тип частиц, значения потоков частиц из плазмы, а также значения коэффициентов отражения и распыления учитывались при дальнейшей обработке результатов. Таким образом, расчёт включал в себя:

— этап 1. Расчёты в Zemax:

расчёт траекторий прямопролётных частиц;

расчёт траекторий отражённых и распылённых частиц;

— этап 2. Математическая обработка:

«взвешивание» (нормировка) результатов с учётом входных данных и заданных параметров поверхности оптического канала;

расчёт взаимодействия потоков частиц с поверхностью первого зеркала.

АЛГОРИТМ РАСЧЁТОВ

В программе Zetax присутствует возможность задать регистрацию на детекторе частиц, испытавших только N соударений со стенкой канала. Это позволяет получить распределение частиц по зеркалу при разных N , а также значения коэффициентов ослабления потока $A_N = n_{\text{register}}/n_{\text{launch}}$, где N — количество соударений частицы со стенкой; n_{register} — количество частиц, испытавших N соударений и достигших детектора; n_{launch} — количество частиц, выпущенных из источника. В результате расчётов было получено, что $\sum_{N=0}^6 A_N$ отличается от $\sum_{N=0}^{\infty} A_N$ менее, чем на 0,1%, поэтому в дальнейшем приводятся только результаты расчётов с значениями N от 0 до 6.

Случай $N = 0$ соответствует прямому потоку частиц, т.е. частиц, попадающих из плазмы во входной зрачок без столкновения со стенками выреза в ДПС. На рис. 5 показаны распределения коэффициентов ослабления прямого потока $\alpha_0(X, Y)$ и непрямого потока (отражённых и расплывённых частиц)

Рис. 5. Распределение коэффициентов ослабления потока $\alpha_0(X, Y)$ (а) и $\alpha_\Sigma(X, Y)$ (б) по площади зеркала (для EPP12)

$\alpha_\Sigma(X, Y) = \sum_{N=1}^6 \alpha_N(X, Y)$ по поверхности зеркала, в табл. 2 приведены их интегральные значения A_0 и A_Σ соответственно. На рисунке видно, что благодаря геометрии канала прямые частицы из плазмы не попадают на края зеркала, при этом частицы, испытавшие взаимодействие со стенкой, не попадают в центральную часть зеркала. Несимметричность распределения, представленного на рис. 5, б, вызвана несимметричностью выреза в канале EPP12.

Т а б л и ц а 2. Значения коэффициентов ослабления прямого и непрямого потока нейтральных частиц из плазмы на первое зеркало СВЛ

Коэффициент ослабления потока	EPP11	EPP12
A_0	$1,1 \cdot 10^{-5}$	$4,75 \cdot 10^{-5}$
A_Σ	$1,0 \cdot 10^{-6}$	$6,84 \cdot 10^{-6}$

Прямой поток частиц, достигший зеркала (Γ_x), может быть вычислен по формуле

$$\Gamma_x = A_0 f_{x_in} S_{ap}, \quad (1)$$

где f_{x_in} — плотность потока частиц на входе в канал; S_{ap} — площадь выреза. Подставляя вместо f_{x_in} значения плотности потоков Ве и D, Т из табл. 1, были получены прямые потоки Ве и D, Т на первое зеркало (Γ_{Be} и Γ_{DT}).

Поток отражённых от стенок канала частиц (Γ_{refl_x}) вычислялся по формуле

$$\Gamma_{refl_x} = f_{x_in} S_{ap} \sum_{N=1}^6 A_N (R_x)^N, \quad (2)$$

здесь R_x — коэффициент отражения частиц от стенок канала.

Выражение для вычисления потока на первое зеркало бериллия, распылённого со стенок канала, может быть записано следующим образом:

$$\Gamma_{sputt_Be} = f_{DT_in} S_{ap} \sum_{N=1}^6 A_N P_N. \quad (3)$$

В этой формуле f_{DT_in} — плотность потока атомов D, Т из плазмы; S_{ap} — площадь выреза в оптическом канале; P_N — вероятность того, что частица, будучи распылённой со стенки канала, достигнет зеркала и при этом понадобится N взаимодействий частицы со стенкой. Значения P_N , в свою очередь, определяются по формуле

$$P_N = Y_{Be} \sum_{i=1}^N (R_{DT})^{i-1} (R_{Be})^{N-i}, \quad (4)$$

где Y_{Be} — коэффициент распыления Ве атомами D и Т.

Чтобы получить распределения плотности потоков частиц по поверхности зеркала ($f_{Be}(X, Y)$ и $f_{DT}(X, Y)$), необходимо выполнить нормировку распределений, представленных на рис. 5, на соответствующие потоки частиц, полученные по формулам (1)–(3):

$$f_{DT}(X, Y) = \frac{\alpha_0(X, Y)}{A_0} \Gamma_{DT} + \frac{\alpha_\Sigma(X, Y)}{A_\Sigma} \Gamma_{refl_DT}; \quad (5)$$

$$f_{Be}(X, Y) = \frac{\alpha_0(X, Y)}{A_0} \Gamma_{Be} + \frac{\alpha_\Sigma(X, Y)}{A_\Sigma} (\Gamma_{refl_Be} + \Gamma_{sputt_Be}). \quad (6)$$

В свою очередь, используя распределения плотностей потоков частиц, может быть рассчитан профиль скорости эрозии/осаждения примесей для первого зеркала диагностики СВЛ:

$$G_{dep_Be}(X, Y) = Q_{Be} \frac{a_{Be} f_{Be}(X, Y)}{N_A \rho_{Be}}; \quad (7)$$

$$G_{er_Be}(X, Y) = Y_{Be} \frac{a_{Be} f_{DT}(X, Y)}{N_A \rho_{Be}}; \quad (8)$$

$$G_{er_Mo}(X, Y) = Y_{Mo} \frac{a_{Mo} f_{DT}(X, Y)}{N_A \rho_{Mo}}. \quad (9)$$

В этих формулах $G_{dep_Be}(X, Y)$, $G_{er_Be}(X, Y)$ — распределения скорости осаждения и распыления Ве по площади зеркала; $G_{er_Mo}(X, Y)$ — распределение скорости распыления молибденовой поверхности зеркала (в случае отсутствия загрязнений на зеркале); Q_{Be} — коэффициент прилипания бериллия к зеркалу (в рамках консервативных оценок предполагалось, что весь бериллий, достигший первого зеркала, осаждается на нём, т.е. $Q_{Be} = 1$); Y_{Mo} — коэффициент распыления Мо (поверхности зеркала) атомами D и Т, значение $Y_{Mo} = 0,002$ [11]; a_{Be} , a_{Mo} и ρ_{Be} , ρ_{Mo} — атомные массы и плотности бериллия и молибдена соответственно; N_A — число Авогадро.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 6, *а* показаны профили скорости эрозии/осаждения вдоль короткой стороны зеркала (координаты X), полученные по формулам (7)–(9) для канала EPP12. Результирующая скорость изменения профиля зеркала (рис. 6, *б*) вычисляется следующим образом: распределения скорости осаждения и распыления Ve вычитаются друг из друга, а для тех участков зеркала, где их разница равна или меньше нуля, подставляются значения скорости распыления молибденовой поверхности зеркала.

Рис. 6. Канал EPP12: *а* — профили скорости эрозии (— Be ; — Mo)/осаждения (— Be) вдоль X -координаты зеркала; *б* — скорость изменения профиля зеркала $M1$

Согласно работе [7] энергия атомов D , T на входе в оптический канал СВЛ составляет 200 эВ для HD-режима и 300 эВ для LD-режима работы ИТЭР (см. табл. 1). Коэффициент распыления Be атомами D , T с такими энергиями составляет $Y_{Be} = 0,04$ (HD) и $Y_{Be} = 0,06$ (LD) [11]. Представленные на рис. 6 графики получены для стационарной стадии разряда в режиме с высокой плотностью (HD) в предположении, что Be всюду осаждается в виде плотной плёнки (табл. 3, вариант I). Кроме того, были рассмотрены ещё три варианта: Be всюду осаждается в виде рыхлой плёнки (вариант II); на стенках канала Be образует плотную плёнку, а на зеркале рыхлую (вариант III); наоборот, на стенках образуется рыхлая плёнка и плотная — на зеркале (вариант IV). Соответствующие значения Y_{Be} приведены в табл. 3.

Таблица 3. Комбинации значений Y_{Be} для поверхности зеркала и стенки канала для двух стационарных режимов разряда

Вариант	Режим HD		Режим LD	
	Стенка канала	Зеркало	Стенка канала	Зеркало
I	0,04	0,04	0,06	0,06
II	0,2	0,2	0,3	0,3
III	0,04	0,2	0,06	0,3
IV	0,2	0,04	0,3	0,06

Результирующая скорость изменения профиля зеркал представлена на рис. 7 для всех перечисленных случаев (для каналов EPP11 и EPP12 в HD-режиме работы ИТЭР). Физическая ширина зеркала рав-

Рис. 7. Скорость изменения профиля зеркала вдоль X -координаты в 11-м и 12-м экваториальных каналах для вариантов I (—), II (—), III (—), IV (—) в HD-режиме работы ИТЭР: *а* — EPP11; *б* — EPP12

на 60 мм, рабочая область ограничивается 44 мм и в вариантах I—III рабочая область полностью расположена в зоне эрозии.

Для оценки времени жизни зеркала необходимо вычислить глубину эрозии зеркала и толщину осаждающейся на нём плёнки за год работы ИТЭР. Эти данные приведены в табл. 4 для 3000 разрядов за год при длительности импульса 400 с.

Т а б л и ц а 4. Максимальная толщина эрозии/осаждения за год работы ИТЭР, нм/год

Вариант	EPP11				EPP12			
	Эрозия (центр), нм/год		Осаждение (на краю), нм/год		Эрозия (центр), нм/год		Осаждение (на краю), нм/год	
	HD	LD	HD	LD	HD	LD	HD	LD
I	96	22	68	23	93	21	181	61
II	97	22	341	114	95	21	898	300
III	97	22	–0,4	0,1	95	21	–0,6	–0,1
IV	96	22	654	218	93	21	1496	499

Из табл. 4 видно, что в стационарном режиме работы ИТЭР эрозия в рабочей области не превышает 100 нм/год. При таком уровне эрозии зеркала, изготовленные из монокристаллического молибдена, способны сохранять работоспособность на протяжении всего периода работы ИТЭР [2, 3]. Осаждение Ве на краю зеркала в самом худшем случае (вариант IV) способно лишь немного сузить угол обзора диагностики.

Полученные данные хорошо согласуются с экспериментами на токамаке JET ILW [12, 13], где в течение трёх кампаний в различных частях установки экспонировались кассеты с зеркалами размером 1×1 см, изготовленными из поликристаллического Мо. Общее время экспонирования составило 63,5 ч, что соответствует примерно 550 импульсам ИТЭР при длительности импульса 400 с. В экваториальной плоскости токамака была установлена кассета с пятью зеркалами: одно непосредственно на переднем краю кассеты и по два, заглублённых на 1,5 и 4,5 см. Два заглублённых зеркала (по одному для каждой глубины) были дополнительно защищены набором диафрагм диаметром 0,57 см. В итоге зеркальный коэффициент отражения для образцов, установленных в экваториальном сечении, даже немного возрос в видимой части спектра, что, по-видимому, связано с распылением оксидной плёнки, при этом диффузный компонент увеличился до 1,5—4%. Такое поведение коэффициента отражения характерно для поликристаллических Мо-зеркал, подвергнутых физическому распылению [5].

ОЦЕНКА ДЕГРАДАЦИИ ЗЕРКАЛ M2—M4

Для оценки потоков D, T и Ве на зеркала M2—M4 была использована простая модель, в рамках которой каждое предыдущее зеркало (M_{N-1}) выступает равнонаправленным точечным источником нейтральных атомов, при этом величина потока спадает пропорционально квадрату расстояния. Общая формула для вычисления потока на зеркала M2—M4 может быть записана в виде

$$\Gamma_{M_N}^{\text{in}} = \frac{S_{M_N}}{2\pi L^2} \Gamma_{M_{N-1}}^{\text{out}}, \quad (10)$$

где $\Gamma_{M_N}^{\text{in}}$ — поток на зеркало M_N ; $\Gamma_{M_{N-1}}^{\text{out}}$ — поток с зеркала M_{N-1} ; S_{M_N} — площадь зеркала M_N ; L — расстояние между центром зеркала M_{N-1} и краем зеркала M_N .

Так как центр зеркала M1 находится в эрозионной зоне, а края подвержены осаждению атомов Ве, то оценки потока Ве на зеркало M2 были сделаны исходя из того, что поток Ве, приходящийся на центр зеркала M1, будет полностью распылён (либо отражён), поток Ве, приходящийся на край зеркала M1, будет отражаться с коэффициентом $R_{\text{Ве}} = 0,5$, а Ве, осевший на краю M1, будет распыляться потоком D, T в соответствии с значением $Y_{\text{Ве}}$. Поток D, T в рамках проводимых оценок отражается от зеркал с коэффициентом $R_{D, T} = 0,5$.

Кроме того, для зеркала M2 была выполнена оценка потока Мо, распыляемого с центральной части зеркала M1 прямым потоком атомов D, T из плазмы. На рис. 8 показано, как формируются потоки нейтральных атомов от зеркала M1 на зеркало M2.

Таким образом, потоки с зеркала M1 могут быть вычислены по следующим формулам:

$$\Gamma_{M1_Be}^{out} = \Gamma_{Centr_M1_Be}^{in} + \Gamma_{Edge_M1_Be}^{in} R_{Be} + \Gamma_{Edge_M1_D,T}^{in} Y_{Be}; \quad (11)$$

$$\Gamma_{M1_Mo}^{out} = \Gamma_{Centr_M1_D,T}^{in} Y_{Mo}; \quad (12)$$

$$\Gamma_{M1_D,T}^{out} = \left(\Gamma_{Centr_M1_D,T}^{in} + \Gamma_{Edge_M1_D,T}^{in} \right) R_{D,T}. \quad (13)$$

В этих формулах $\Gamma_{M1_Be}^{out}$, $\Gamma_{M1_Mo}^{out}$, $\Gamma_{M1_D,T}^{out}$ — потоки

Рис. 8. Схема расчёта потока нейтральных атомов с зеркала M1

Be, Mo и D, T с зеркала M1; $\Gamma_{Centr_M1_D,T}^{in}$, $\Gamma_{Centr_M1_Be}^{in}$ — потоки D, T и Be на центр зеркала M1; $\Gamma_{Edge_M1_D,T}^{in}$, $\Gamma_{Edge_M1_Be}^{in}$ — потоки D, T и Be на край зеркала M1; $R_{D,T}$, R_{Be} — коэффициенты отражения для D, T и Be; Y_{Be} , Y_{Mo} — коэффициенты распыления Be и Mo атомами D, T.

Для зеркал M3, M4 поток Be на следующее зеркало (M_N) рассчитывается в предположении, что Be с предыдущего зеркала (M_{N-1}) отражается с коэффициентом $R_{Be} = 1$. Поток D, T, как и в предыдущем случае, отражается с коэффициентом $R_{D,T} = 0,5$. Значения Y_{Be} брались из табл. 3 для вариантов I и II. Полученные значения потоков были пересчитаны в скорости эрозии и роста плёнки по формулам (7)–(9). Приведённые в табл. 5 значения не учитывают конкурирующие процессы, т.е. при расчёте скорости роста плёнки не учитывается наличие эрозии, а скорость эрозии вычисляется в предположении, что всё зеркало уже покрыто толстым слоем плёнки.

Т а б л и ц а 5. Скорость эрозии и роста плёнки для зеркал M2—M4

Канал	Зеркало	Эрозия Be, нм/год		Осаждение Be, нм/год		Эрозия Mo, нм/год	Осаждение Mo, нм/год
		$Y_{Be} = 0,04$	$Y_{Be} = 0,2$	$Y_{Be} = 0,04$	$Y_{Be} = 0,2$		
EPP11	M2	18	91	2	11	1,7	3,4
	M3	0,02	0,08	0,004	0,02	—	—
	M4	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	—	—
EPP12	M2	18	91	4	17,4	1,7	3,4
	M3	0,02	0,08	0,007	0,03	—	—
	M4	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	—	—

Полученные результаты показывают, что зеркало M2 будет подвержено осаждению Be и Mo, которое будет частично счищаться потоком атомов D, T из плазмы. Однако интенсивность осаждения очень мала, и плёнка, образовавшаяся за год работы ИТЭР, может быть удалена в течение одного цикла работы СОЗ. Расстояние между зеркалами M2 и M3 примерно в 5 раз больше, чем между M1 и M2 (см. рис. 1 и 2), что приводит к значительному снижению потока нейтральных частиц на зеркала M3 и M4, поэтому сколь угодно значимая деградация зеркал M3, M4 не ожидается в течение всего периода работы ИТЭР.

ОБСУЖДЕНИЕ

Уместно ещё раз напомнить, что основной целью данной работы является максимально консервативная оценка скорости деградации зеркал, поэтому при расчёте применялись наиболее неблагоприятные входные данные: плотности потоков нейтралов на первую стенку были взяты из [7], а например, не из [14], где они на порядок ниже. Параметры расчёта также выбирались с заведомым превышением или занижением значений над ожидаемыми в зависимости от того, что приводило к более консервативной оценке.

В описанном алгоритме не учитывается потеря энергии частицей при отражении от стенок канала. Это ограничение означает, что вероятность распыления примесей со стенок канала атомами D и T не уменьшается после нескольких отражений, коэффициент отражения частиц Be, D и T не снижается по-

сле соударений, что повышает вероятность для частиц достигнуть зеркала. Для анализа того, как учёт потери энергии может повлиять на результат, была проведена серия расчётов с различным количеством учитываемых соударений частиц со стенкой канала. В табл. 6 приведена максимальная толщина плёнки Ве за год работы ИТЭР на краю зеркала в зависимости от количества учитываемых соударений для D, T и Ве (EPP12, HD-режим, вариант II).

Т а б л и ц а 6. Зависимость толщины плёнки на краю зеркала (в нм за год работы ИТЭР) от количества учитываемых соударений для D, T и для Ве (EPP12, HD-режим, вариант II)

Учитываемые соударения	$N_{\text{Ве}} = 1$	$N_{\text{Ве}} = 2$	$N_{\text{Ве}} = 3$	$N_{\text{Ве}} = 4$	$N_{\text{Ве}} = 5$	$N_{\text{Ве}} = 6$
$N_{\text{D, T}} = 1$	221	620	942	1037	1075	1091
$N_{\text{D, T}} = 2$	153	511	821	917	955	970
$N_{\text{D, T}} = 3$	122	462	766	862	900	915
$N_{\text{D, T}} = 4$	115	451	754	850	888	903
$N_{\text{D, T}} = 5$	113	448	751	847	884	900
$N_{\text{D, T}} = 6$	112	447	749	845	883	898

В работах [8, 10, 15] показано, что основная часть потока Ве из камеры падает на стенку канала под углами, близкими к нормали, а согласно данным [16] энергетический коэффициент отражения Ве от Ве для углов падения $<30^\circ$ не превышает 0,5%. Это означает, что основная часть Ве осаждается на стенке канала уже после первого столкновения, т.е. $N_{\text{Ве}} = 0$. С учётом того, что распылённый со стенок канала Ве может повторно провзаимодействовать со стенкой под произвольным углом, можно было бы ограничиться значением $N_{\text{Ве}} = 2$. Энергия атомов D, T в ≈ 10 раз выше, угловое распределение на входе в канал более однородное [7, 8, 10], энергетический коэффициент отражения D, T от Ве заметно выше [16], поэтому разумным кажется использование значений $N_{\text{D, T}} \geq 3$. Для унификации расчётов удобно было использовать одинаковые значения для $N_{\text{Ве}}$ и $N_{\text{D, T}}$, а поскольку целью данной работы является проведение оценки сверху, то были выбраны значения $N_{\text{Ве}} = 6$, $N_{\text{D, T}} = 6$. В проведённых расчётах угловое распределение потока и Ве, и D, T на входе в канал было задано равномерным, что также только повышает вероятность Ве достигнуть поверхности первого зеркала.

Ещё одним ограничением алгоритма является отсутствие возможности задать разные угловые распределения коэффициентов отражения и распыления, поскольку и для отражённых, и для распылённых частиц D, T и Ве используется один и тот же расчёт траекторий. В приведённых оценках использовалось косинусоидальное (ламбертовское) угловое распределение, но если его заменить на другой предельный случай — на нормальное распределение с полушириной 6° , т.е. близкое к зеркальному отражению, то максимальная толщина плёнки увеличивается примерно на 10%, при этом профиль осаждения на зеркале становится более пикированным, а сами пики сдвигаются к краям зеркала, увеличивая часть зеркала, находящуюся в эрозионной зоне. В результате выбор закона углового распределения не влияет на результаты расчётов для рабочей области первого зеркала.

Значения коэффициентов отражения и распыления также зависят от угла падения частиц на поверхность оптического канала. В приведённых оценках использовался коэффициент отражения $R = 0,5$ и для Ве, и для D, T без учёта угловой зависимости. Однако согласно [16] коэффициент отражения для D, T энергией 200—300 эВ превышает использованное значение только для скользящих углов падения ($>80^\circ$), а для более низкоэнергетических атомов Ве [8] такое значение коэффициента отражения и вовсе является сверхконсервативной оценкой. Угловое распределение коэффициента распыления Ве атомами D, T энергией 200—300 эВ согласно [11] почти полностью попадает в диапазон использованных значений 0,04—0,2, и только для узкого диапазона углов ≈ 65 — 75° коэффициент распыления может достигать значения 0,4. Распыление Ве атомами Ве не учитывалось ввиду того, что большая часть атомов Ве на входе в канал имеют энергию ≈ 10 эВ.

Использование кода для оптических расчётов приводит к невозможности учесть столкновение частиц на остаточном газе, но, как уже было сказано, этим можно пренебречь, если давление в исследуемой области не превышает 0,1 Па [10]. При более высоком давлении внутри УВЗ рассеяние Ве на остаточном газе приведёт к размытию границы зоны осаждения, т.е. профиль осаждения станет менее пикированным. Для рассмотренных вариантов I—III скорость роста плёнки на краю зеркала и скорость распы-

ления в центре уменьшатся, но рабочая область зеркала всё равно останется в зоне эрозии. Для варианта 4 ширина зоны осаждения на краях рабочей области зеркала может незначительно увеличиться по сравнению с результатами расчётов, приведённых на рис. 7.

Ещё одним эффектом, потенциально способным повлиять на результаты расчётов, является переосаждение Ве с краёв на центр зеркала. Поскольку этот эффект также приведёт к размытию границы зоны осаждения, то для его оценки может быть использован подход, описанный в предыдущем абзаце, с аналогичными результатами.

К достоинствам описанного алгоритма можно отнести сокращение времени расчётов за счёт унификации трассировки транспорта различных частиц, а также отсутствие необходимости проводить ресурсоёмкие расчёты трассировки заново для различных сценариев (комбинаций параметров). Например, данные о потоках нейтралов на первое зеркало в нестационарных режимах могут быть легко получены, когда появятся данные о потоках частиц на первую стенку в этих режимах.

Отдельно следует отметить, что все описанные предположения и ограничения влияют лишь на толщину осаждённых плёнок и их распределение на краю зеркала, рабочая область зеркала находится в эрозионной зоне, размер которой определяется только соотношением плотности потоков D, T и Ве на входе в канал и геометрией канала. При этом в ряде работ, проведённых на лабораторных установках, показано, что бомбардировка поверхности молибденовых зеркал потоками частиц водорода и гелия до флюенса $\sim 10^{25}$ частиц/м² может приводить к накоплению дефектов в поверхностном слое, приводящему к увеличению коэффициента диффузного рассеяния [6, 17, 18]. При наших консервативных входных данных плотность потока D, T в центре первого зеркала во время разряда составит $\approx 2,5 \cdot 10^{18}$ частиц/(м²·с), что соответствует флюенсу $3 \cdot 10^{24}$ частиц/м² за год работы ИТЭР в HD-режиме (поток гелия на стенку по оценке составит примерно 5% от потока водорода [14]). Следует принять во внимание, что режим бомбардировки поверхности в ИТЭР будет существенно отличаться от лабораторных условий: плотность потока частиц на зеркала будет более чем на порядок ниже, между разрядами будут существенные паузы, а температура зеркал будет превышать 300 °С, что будет способствовать релаксации дефектов. В итоге можно ожидать, что эффективная скорость накопления дефектов в поверхностном слое будет существенно меньше и критический уровень диффузного рассеяния будет достигнут в конце работы ИТЭР.

В то же время результаты экспериментов при разработке СОЗ показывают, что с помощью интенсивного распыления в аргоне монокристаллического молибденового зеркала можно удалить дефектный поверхностный слой и снизить диффузное рассеяние до приемлемых значений [18]. Таким образом, потенциально накопление дефектов в поверхностном слое зеркала может представлять проблему при больших сроках эксплуатации установки, но работоспособность зеркал может быть восстановлена с помощью нескольких (1)–(4) циклов интенсивной работы СОЗ в аргоне.

ВЫВОДЫ

Проведена консервативная оценка скорости изменения профиля поверхности первого зеркала диагностики СВЛ на ИТЭР для стационарной стадии разряда ИТЭР, а также оценка скорости деградации остальных внутрикамерных зеркал. Расчёты показывают, что благодаря конструкции УВЗ СВЛ с малым входным зрачком переосаждение бериллия со стенок оптического канала возможно только на нерабочих краях первого зеркала с максимальной скоростью роста плёнки 1,5 мкм/год. Рабочая же область зеркала находится в зоне эрозии, где скорость распыления поверхности составляет ≈ 100 нм/год, что приемлемо для зеркал, изготовленных из монокристаллического молибдена.

Оценка скорости деградации остальных внутрикамерных зеркал показала, что зеркало М2 будет подвержено осаждению бериллиево-молибденовой плёнки. Согласно расчётам толщина осевшей за год работы ИТЭР плёнки не превысит 20 нм, такое загрязнение может быть устранено за один цикл работы системы очистки зеркал. Система очистки также может быть использована для очистки краёв первого зеркала или в случае загрязнения зеркал в нестационарных режимах работы ИТЭР и в результате внештатных ситуаций, таких как разгерметизация системы водяного охлаждения. Сколько-нибудь значимая деградация зеркал М3, М4 не ожидается вследствие их удалённости от УВЗ на достаточно большое расстояние от входа в диагностический канал.

REFERENCES

1. **Andreenko E.N., Alekseev A.G., Kukushkin A.B. et al.** — Fusion Engineering and Design, 2017, vol. 123, pp. 825—829.
2. **Bardamid A.F., Vukolov K.Yu., Konovalov V.G., Orlovsky I.I. et al.** — Plasma Devices and Operation, 2004, vol. 12, iss. 3, pp. 203—208.
3. **Orlovskiy I., Alekseev A., Andreenko E. et al.** — Fusion Engineering and Design, 2015, vol. 96—97, pp. 899—902.
4. **Rogov A.V., Kapustin Yu.V.** — Uspekhi prikladnoy fiziki (Advances in applied physics), 2016, vol. 4, № 3, pp. 240—247 (in Russian).
5. **Kapustin Yu.V., Rogov A.V.** — VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 2019, vol. 42, issue 1, pp. 57—65 (in Russian).
6. **Rogov A.V., Kapustin Yu.V.** — In coll.: XVII All-Russia conference «Diagnostics of high-temperature plasma». Zvenigorod, 13—17 June 2017. Collection of abstracts, pp. 68—70 (in Russian).
7. **Kotov V.** — Nuclear Fusion, 2016, vol. 56, p. 106027 (11 p.).
8. **Kotov V., Reiter D., Litnovsky A. et al.** — Physica Scripta, 2011, p. 014071 (4 p.).
9. **Gorshkov A., Alekseev A., Andreenko E. et al.** — In: 30th Symposium on Fusion Technology. Giardini Naxos, Italy, 16—21 September 2018, P2.050.
10. **Kogut D.K., Trifonov N.N., Kurnaev V.A.** — J. of Nuclear Materials, 2013, vol. 438, pp. S731—S734.
11. **Eckstein W., Garcia-Rosales C., Roth J., Ottenberger W.** — Max-Planck-Institut für Plasma, Plasmaphysik Report, 1993, IPP 9/82.
12. **Moon S. et al.** — Nuclear Materials and Energy, 2019, vol. 19, pp. 59—66.
13. **Litnovsky A. et al.** — Nuclear Fusion, 2019, vol. 59, p. 066029 (10 p.).
14. **Brooks J., Allain J.** — Nuclear Fusion, 2008, vol. 48, p. 106027 (11 p.).
15. **Kotov V.** — In: 43rd EPS Conf. on Plasma Physics. Leuven, Belgium, 4—8 July 2016, P5.051.
16. www.eirene.de/html/surface_data.html.
17. **Sugie T. et al.** — J. of Nuclear Materials, 2004, vol. 329—333, Part B, pp. 1481—1485.
18. **Rogov A.V., Kapustin Yu.V., Gorshkov A.V., Akhtyrskiy S.V.** — In: 30th Meeting of the ITPA Diagnostics Topical Group. Novosibirsk, 21—24 June 2016.

AUTHORS

Andreenko E.N. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; International Fusion Projects Coordinating Centre, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; Andreenko_EN@nrcki.ru

Orlovskiy I.I. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; International Fusion Projects Coordinating Centre, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; Orlovskiy_ii@nrcki.ru

Alekseev A.G. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; International Fusion Projects Coordinating Centre, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; Alekseev_AG@nrcki.ru

Morozov A.A. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; International Fusion Projects Coordinating Centre, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; Morozov_AA@nrcki.ru

Received 19 May 2019

Revised 20 June 2019

Accepted 25 June 2019

Problems of Atomic Science and Technology
Ser. Thermonuclear Fusion, 2019, vol. 42, issue 3, pp. 13—24