УДК: 533.9.01:533.924

УЧЁТ ИЗМЕНЕНИЯ ПРОФИЛЯ ПАРАМЕТРОВ ПРИГРАНИЧНОЙ ПЛАЗМЫ ПРИ ОЦЕНКЕ РАСПЫЛЕНИЯ ДИВЕРТОРНЫХ ПЛАСТИН ТОКАМАКА JET В РЕЖИМЕ С ГРАНИЧНО-ЛОКАЛИЗОВАННЫМИ МОДАМИ

И.Е. Бородкина, В.А. Курнаев

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

Распыление вольфрамовых диверторных пластин на токамаке JET с ИТЭР-подобной стенкой при импульсных срывах энергии и частиц плазмы (ELM) является одним из основных источников примеси вольфрама в центральной плазме. Разработана методика моделирования движения ионов в ELM, использующая измеренные ленгмюровскими зондами профили плотности ионного потока на диверторную пластину, позволяющая оценить распыление вольфрамовых диверторных пластин во время ELM и между ELM. Учёт уменьшения температуры и плотности плазмы в области пьедестала при его разрушении во время ELM позволил получить согласующиеся с измерениями профили потока частиц и тепла в диверторе при физически обоснованной величине длины магнитной линии от пьедестала до поверхности пластин дивертора. Оценка потока распылённых атомов вольфрама с диверторной пластины показала, что ELM первого типа вносят существенный вклад (~85%) в распыление диверторной пластины в разрядах на JET, что согласуется со спектроскопическими измерениями излучения распылённых атомов вольфрама на длине волны 400,9 нм.

Ключевые слова: физическое распыление, ELM, вольфрамовый дивертор, JET.

ACCOUNTING FOR EDGE PLASMA PARAMETERS DYNAMICS AT JET DIVERTOR SPUTTERING ESTIMATION DURING EDGE-LOCALIZED MODES

I.E. Borodkina, V.A. Kurnaev

National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

The sputtering of tungsten divertor tiles at JET ITER-like wall (ILW) during Edge-Localized Modes (ELM) is one of the main sources of W impurity in the core plasma. The analytical approach for interpretation of the Langmuir probe (LP) measurements of ion flux at the divertor tile is elaborated to model the ELM ion parallel transport and to estimate the W sputtering flux from divertor in inter- and intra-ELM conditions. Accounting for the pedestal temperature and density decrease at the pedestal crash during ELM allows obtaining the particle and heat fluxes profiles at the divertor tile corresponding to the measurements at the physically correct magnetic connection length. Estimates of tungsten sputtered flux in intra-ELM and inter-ELM conditions show that Type I ELMs contribute significantly (~85%) to the overall tungsten sputtering which is in a good agreement with the divertor optical emission spectroscopy on the 400.9 nm atomic neutral tungsten line in JET discharges.

Key words: physical sputtering, ELM, tungsten divertor, JET.

DOI: 10.21517/0202-3822-2019-42-3-5-12

ВВЕДЕНИЕ

Основным режимом работы международного экспериментального термоядерного реактора ИТЭР с мощностью термоядерной реакции 500 МВт является режим улучшенного удержания плазмы (H-мода), для которого, однако, характерны локализованные на периферии плазмы неустойчивости, так называемые гранично-локализованные моды (ELM) [1]. В режиме с H-модой происходит увеличение градиентов температуры и плотности плазмы на периферии плазменного шнура, формируется пьедестал параметров плазмы. ELM сопровождаются выбросами частиц и энергии плазмы из области удержания в пристеночный слой, энергия налетающих ионов значительно возрастает [2], что вызывает повышенное распыление и в некоторых случаях расплавление обращённых к плазме элементов (ОПЭ) токамака [3]. Это обуславливает необходимость детального моделирования потоков частиц и тепла на диверторные пластины при наличии ELM.

Как было продемонстрировано на токамаке JET с ИТЭР-подобной стенкой (бериллий (Be) для первой стенки основной камеры и вольфрам (W) для диверторных пластин), в стационарном режиме распыление диверторных пластин идёт, в основном, за счёт примесных ионов бериллия — материала первой стенки основной камеры благодаря высокому порогу распыления вольфрама [4] изотопами во-

дорода. В ИТЭР для снижения тепловых нагрузок и распыления диверторных пластин в стационарном режиме планируется, что токамак будет работать в режиме детачмента с диверторной плазмой высокой плотности [5]. Однако при ELM даже в режиме детачмента тепловой поток на диверторные пластины остаётся существенным [6, 7], распыление W существенно возрастает за счёт высокоэнергетичных ионов дейтерия D^+ , что приводит к тому, что распыление диверторных пластин при ELM является одним из основных источников появления примеси W в центральной плазме [8]. Оценки [9] показали, что в ИТЭР при отношении концентрации вольфрама к концентрации плазмы, превышающем $5 \cdot 10^{-5}$, может произойти существенное охлаждение плазмы и прекращение термоядерной реакции. Предотвращение накопления W в центральной области токамака является важной задачей, для которой необходимо изучать и численно описывать распыление W диверторных пластин как основной источник примеси W в реакторе.

В работе [10] для расчёта распыления горизонтальной диверторной пластины в режиме с ELM с учётом распределения налетающих ионов по энергиям и углам падения была предложена методика аналитического описания налетающих плазменных потоков, измеренных ленгмюровскими зондами. Выявлено, что распыление W с внешней диверторной пластины токамака JET увеличивается практически на порядок в режиме с ELM первого типа с энергией до 0,3 МДж. Результаты моделирования согласуются со спектроскопическими измерениями интенсивности излучения атомов распылённого W [11]. Данная методика была также применена для оценки распыления диверторных пластин в разрядах на JET в водородной плазме и при наличии ELM смешанного и третьего типа [12].

В данной работе методика оценки распыления диверторных пластин токамака JET [10] была доработана с учётом динамики параметров плазмы в области пьедестала во время ELM. Были включены такие эффекты, как уменьшение температуры и плотности пьедестала при его разрушении во время ELM, а также введён временной интервал вылета частиц с пьедестала, формирующих поток энергии и частиц в ELM. Доработанная методика была протестирована на наборе практически идентичных квазистационарных разрядов в H-моду из двухнедельной экспериментальной кампании «С30С» на токамаке JET с ИТЭР-подобной стенкой (разряды № 83621—83791) [13], позволяющей провести статистический анализ динамики профилей параметров плазмы в области пьедестала и в диверторе во время ELM. В статье кратко описана разработанная методика восстановления функции распределения ионов в ELM по скоростям и приведено обоснование необходимости учёта дополнительных эффектов, представлены результаты учёта изменений параметров плазмы в области пьедестала во время ELM при восстановлении функции распределения ионов в ELM по скоростям с использованием результатов статистического анализа измерений во время экспериментальной кампании «С30С» на токамаке JET, проведены оценки распыления внешней вольфрамовой горизонтальной диверторной пластины во время ELM и между ELM, а также сравнение с результатами, полученными методом спектроскопии.

МЕТОДИКА АНАЛИТИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ НАЛЕТАЮЩИХ ПЛАЗМЕННЫХ ПОТОКОВ ВО ВРЕМЯ ELM

В работе [2] среднюю энергию ионов, падающих на вольфрамовые тайлы внешнего дивертора токамака JET в течение ELM, определяли, используя измерения инфракрасной камерой мощности теплового потока и измерения ленгмюровскими зондами плотности потока ионов. Было выявлено, что энергия налетающих ионов, соответствующая максимальной тепловой мощности ($E_{i, \max}$), приходящей на поверхность горизонтальной пластины внешнего дивертора токамака JET, линейно зависела от измеряемой методом электрон-циклотронной эмиссии электронной температуры пьедестала $T_{e, \max}^{\text{ped}}$ перед его разрушением:

$$E_{i, \max} = (4,23 \text{—} 5,23) T_{e, \max}^{\text{ped}}. \quad (1)$$

Анализ вольтамперной характеристики, измеренной зондами на внешней диверторной пластине, показал, что электроны в ELM имеют достаточно низкую температуру параллельного движения

около поверхности дивертора. Это соответствует теоретической модели Free-Streaming Model для описания параллельного транспорта частиц при ELM [14—16], согласно которой электроны на пути из плазмы к поверхности для сохранения квазинейтральности плазменного потока передают свою параллельную энергию ионам. Малые энергии электронов у поверхности делают возможным насыщение ионного тока на зонд, а следовательно, и измерения потока ионов ленгмюровскими зондами во время ELM.

В работе [17] анализ 74 разрядов на токамаке JET с ИТЭР-подобной стенкой показал, что обнаруженная линейная зависимость энергии ионов от температуры пьедестала выполняется для широкого диапазона параметров пьедестала, для разных типов ELM с различными частотами в разрядах как с дейтерием, так и с водородом. Измерения потока частиц и тепла при ELM и между ними позволили оценить распыление диверторной пластины внешнего дивертора в течение ELM и в стационарном режиме в предположении моноэнергетичности пучка ионов при их нормальном падении на поверхность [2]. Однако для более точного расчёта распыления необходимо учитывать распределение налетающих ионов по энергиям и углам падения, так как коэффициент распыления может измениться на порядок в зависимости от угла падения ионов [18]. В работе [10] была предложена методика аналитической интерпретации налетающих плазменных потоков, измеренных ленгмюровскими зондами, для расчёта распыления внешней диверторной пластины в режиме с ELM с учётом распределения налетающих ионов по энергиям и углам падения.

В рамках этой методики, предполагая смещённое максвелловское распределение ионов по скоростям вылета с пьедестала и используя основные положения теории Free-Streaming Model для параллельного бесстолкновительного транспорта частиц от пьедестала к диверторным пластинам во время ELM, был рассчитан временной профиль потока ионов, приходящих на диверторную пластину. Два параметра, определяющие этот профиль, — средняя начальная температура ионов и длина эффективной магнитной линии, вдоль которой распространяется ELM и которая соединяет экваториальную плоскость токамака со стороны слабого поля и пластину внешнего дивертора (L_{con}), были получены из соответствия рассчитанного и измеренного профилей потока ионов на пластине с использованием выявленной линейной зависимости энергии ионов от температуры пьедестала (1). Таким образом, была восстановлена функция распределения по скоростям вылетающих из плазмы ионов. Далее, используя аналитические выражения для распределения потенциала и конечного участка траектории иона перед падением на поверхность [19, 20], были рассчитаны распределения ионов D^+ и Be^{2+} по энергиям и углам падения на диверторную пластину и соответствующие им коэффициенты распыления вольфрама этими ионами. Однако при восстановлении функции распределения используемая длина составила около 1000—1500 м, что в 1,5—3 раза превосходит рассчитанные величины этого параметра при моделировании ELM в магнитно-гидродинамическом коде JOREK [21, 22]. По различным оценкам [7, 16, 17, 22] величина L_{con} во время ELM обычно превосходит значение данного параметра между ELM в 5—10 раз. В коде JOREK это увеличение связывается со стохастизацией возмущений магнитных линий во время мощных ELM первого типа. Превышение величины параметра L_{con} в разработанной методике по сравнению с известными в литературе оценками данного параметра послужило причиной для приведённого далее более подробного рассмотрения процессов, происходящих в области пьедестала во время ELM.

УЧЁТ ДИНАМИКИ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ В ОБЛАСТИ ПЬЕДЕСТАЛА

Локализованные на периферии неустойчивости являются проявлением МГД-активности плазмы, связанной с разрушением (полным или частичным) внешнего транспортного барьера и выбросом частиц плазмы из области барьера на стенку [23]. В работе [24] проведён статистический анализ профилей параметров плазмы в области пьедестала на основе 54 идентичных разрядов в H-мод с квазистационарными условиями в пристеночной области из двухнедельной кампании «C30C» на токамаке JET с ИТЭР-подобной стенкой [13]. Эта серия разрядов предоставляет уникальный набор данных для статистического анализа эволюции профилей параметров плазмы в области пьедестала и

около ОПЭ во время ELM ($\Delta W_{\text{ELM}} \sim 160$ кДж). На рис. 1 представлены временные зависимости радиальных профилей электронной плотности и температуры плазмы в области пьедестала во время ELM, полученные в работах [24, 25]. Видно, что среднее время падения температуры и плотности находится в диапазоне от 0,4 до 1,2 мс соответственно, а величина падения температуры пьедестала составляет около 300 эВ при температуре пьедестала 500 эВ.

Рис. 1. Когерентно усреднённые профили плотности пьедестала до ELM (0 мс) при максимальном падении давления пьедестала (1,2 мс) и в течение фазы восстановления давления пьедестала (5,8 мс): ● — 0, ▲ — 1,2, ■ — 5,8 мс (а); временные зависимости температуры и плотности плазмы в области пьедестала во время ELM, когерентно усреднённые по многим ELM в серии идентичных разрядов «С30С» на токамаке JET [25] (б)

Для оценки распыления диверторных пластин в течение ELM с учётом распределений по энергии и углам падения ионов на поверхность необходимо определить распределение этих ионов по скоростям при вылете из плазмы во время ELM. Аналогично работе [10] было предположено, что компоненты скорости, перпендикулярные магнитному полю, имеют распределение Максвелла с температурой пьедестала, а компонент скорости, параллельный магнитному полю, — смещённое распределение Максвелла со средней скоростью, равной скорости звука. В данной работе эволюция параметров плазмы в области пьедестала во время ELM была учтена при восстановлении функции распределения по скоростям вылетающих из пьедестала ионов следующим образом:

$$f(v_{\parallel}) = \left(\int_{-\Delta t_{\text{ELM}}/2}^{\Delta t_{\text{ELM}}/2} \frac{1}{\sqrt{\pi} c_s(\tau)} \exp \left(- \left(\frac{1}{c_s(\tau)} \frac{L_{\text{con}}}{t - \tau} - 1 \right)^2 \right) d\tau \right) / \Delta t_{\text{ELM}}; \quad (2)$$

$$T_e^{\text{ped}}(\tau) = T_{e, \text{max}}^{\text{ped}} - \frac{\Delta T_e^{\text{ped}}}{\Delta t_{\text{ELM}}} \left(\tau + \frac{\Delta t_{\text{ELM}}}{2} \right), \quad (3)$$

где Δt_{ELM} — временной интервал вылета из пьедестала частиц, формирующих ELM, равный характерному времени изменения параметров пьедестала; $T_e^{\text{ped}}(\tau)$ — зависимость температуры пьедестала от времени; $c_s(\tau) = \sqrt{\frac{2kT_e^{\text{ped}}(\tau)}{M_i}}$ — ионно-звуковая скорость в области пьедестала.

Необходимо показать, что предположенный вид начального распределения приводит к измеренным в эксперименте временным зависимостям потока и энергии налетающих на поверхность ионов при величине длины магнитной линии от экваториальной плоскости до поверхности пластин дивертора L_{con} , соответствующей оценкам для ИТЭР-подобной стенки [17, 21]. Используя положение теории «Free Streaming Model» о малости пристеночного падения потенциала, было получено выражение для распределения частиц по времени прилёта на поверхность для каждого мгновенного значения температуры и плотности пьедестала по методике, разработанной в предыдущих работах [10, 26], а далее проведено интегрирование по времени разрушения пьедестала:

$$\frac{dN}{dt} = \left(\int_{-\Delta t_{\text{ELM}}/2}^{\Delta t_{\text{ELM}}/2} \frac{N_{\text{ELM}}(\tau)}{\sqrt{\pi} c_s(\tau)} \exp \left(- \left(\frac{1}{c_s(\tau)} \frac{L_{\text{con}}}{t - \tau} - 1 \right)^2 \right) \frac{L_{\text{con}}}{(t - \tau)^2} d\tau \right) / \Delta t_{\text{ELM}}, \quad (4)$$

где $N_{\text{ELM}}(\tau) = 1 - \frac{\Delta n_e^{\text{ped}}}{n_{e,\text{max}}^{\text{ped}} \Delta t_{\text{ELM}}} \left(\tau + \frac{\Delta t_{\text{ELM}}}{2} \right)$ — нормированная зависимость количества вылетающих частиц от времени. Зависимости $N_{\text{ELM}}(\tau)$ и $T_e^{\text{ped}}(\tau)$ были получены, используя результаты статистического анализа плотности и температуры пьедестала, представленные на рис. 1.

Для демонстрации влияния динамики параметров пьедестала на рис. 2 показаны профили потоков ионов на диверторной пластине, вылетевших из пьедестала в пяти последовательных филаментах в течение времени разрушения пьедестала $(-\Delta t_{\text{ELM}}/2 \leq t_{1,2,3,4,5} \leq \Delta t_{\text{ELM}}/2)$ при уменьшающейся температуре пьедестала (3), и также профиль суммарного потока. Видно, что учёт динамики параметров пьедестала ведёт к уширению профиля потока ионов на диверторную пластину.

Рис. 2. Профили потоков ионов, вылетевших из пьедестала в пяти последовательных филаментах (t_1 (—), t_2 (—), t_3 (—), t_4 (—), t_5 (—)) с линейно изменяющейся температурой пьедестала, также показан профиль суммарного потока

На рис. 3, а представлено сравнение когерентно усреднённых по многим ELM измерений тока насыщения в разряде № 83562 из кампании «C30C» и рассчитанных по выражению (4) нормированных временных зависимостей потока ионов, налетающих на поверхность горизонтальной диверторной пластины при ELM с учётом и без учёта эволюции параметров пьедестала во время ELM. Расчёт проводился при $L_{\text{con}} = 500$ м и для следующих параметров плазмы: $T_{e,\text{max}}^{\text{ped}} = 500$ эВ, $n_{e,\text{max}}^{\text{ped}} = 5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$,

Рис. 3. Поток налетающих на поверхность ионов (а) и тепловой поток на дивертор (б) в течение ELM рассчитанные по предложенному методу с учётом и без учёта эволюции параметров пьедестала во время ELM и измеренные в эксперименте [25]: — — $\Delta T_e^{\text{ped}}(t)$, $\Delta n_e^{\text{ped}}(t)$; ---- — ΔT_e^{ped} , $\Delta n_e^{\text{ped}} = \text{const}$; ▲ — эксперимент

$\Delta t_{\text{ELM}} = 1$ мс, $\Delta T_e^{\text{ped}} = 300$ эВ, $\Delta n_e^{\text{ped}} = 1,5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$, которые были определены по рис. 1. Видно, что без учёта динамики пьедестала ширина рассчитанного профиля потока ионов почти в 2 раза меньше ширины измеренного профиля. Используя выражение (4), было получено выражение для распределения теплового потока, налетающего на поверхность диверторной пластины при ELM, по времени с учётом и без учёта эволюции параметров пьедестала. На рис. 3, б представлено сравнение рассчитанных распределений мощности налетающего ELM с когерентно усреднёнными по многим ELM измерениями инфракрасной камерой теплового потока на диверторную пластину из работы [25]. Видно, что рассчитанный с учётом эволюции параметров пьедестала профиль теплового потока, приходящего на поверхность диверторной пластины при ELM, хорошо согласуется с экспериментом. Используя профили потока тепла и частиц, была рассчитана временная зависимость средней энергии ионов, приходящих на поверхность во время ELM. Энергия налетающих ионов, соответствующая максимальной тепловой мощности, приходящей на поверхность дивертора, составила 1,8 кэВ, что хорошо согласуется с величиной, рассчитанной по линейной зависимости. Можно сделать вывод, что учёт уменьшения температуры и плотности пьедестала при его разрушении во время ELM позволяет восстановить функцию распределения ионов по скоростям при вылете из пьедестала (2) и получить согласующиеся с измерениями профили потока частиц и тепла на поверхность дивертора при величине длины магнитной линии от пьедестала до поверхности пластин дивертора L_{con} , соответствующей оценкам для JET с ИТЭР-подобной стенкой.

РАСЧЁТ РАСПЫЛЕНИЯ ВОЛЬФРАМОВОЙ ДИВЕРТОРНОЙ ПЛАСТИНЫ ВО ВРЕМЯ ELM

Используя описанное распределение вылетающих из плазмы ионов по скоростям (2), а также аналитические выражения для распределения потенциала и конечного участка траектории иона перед падением [20], были рассчитаны распределения ионов D^+ и Be^{2+} по энергиям и углам падения на поверхность внешней вольфрамовой диверторной пластины при ELM с $T_{e, \text{max}}^{\text{ped}} = 500$ эВ для следующих параметров пристеночной плазмы: $B = 2$ Тл, $T_e^{\text{sheath}} = 35$ эВ, $n_e^{\text{sheath}} = 1,2 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$, угол наклона магнитного поля $\alpha = 87^\circ$. Пристеночное падение потенциала рассчитывалось по аналитической формуле [19] при низкой электронной пристеночной температуре T_e^{sheath} согласно измерениям ленгмюровскими зондами [2]. Ионы Ве с зарядом 2 составляют основную часть примесных ионов в разрядах на JET, а их концентрация в потоке частиц в дивертор равна 0,5% [2, 4]. Наиболее вероятный угол падения ионов D^+ и Be^{2+} , отсчитываемый от нормали к поверхности, составил 70° , а средняя энергия падения — около 1,3 кэВ. Для стационарного режима, без ELM, распыление вольфрамовых диверторных пластин происходит в основном за счёт примесных ионов Be^{2+} , для которых также были рассчитаны распределения по энергиям и углам падения на поверхность при следующих параметрах плазмы: $B = 2$ Тл, $T_e^{\text{sheath}} = 35$ эВ, $n_e^{\text{sheath}} = 6 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$, $\alpha = 87^\circ$ [13].

Используя рассчитанные энергетические и угловые распределения налетающих на поверхность ионов, по формуле Экштайна [26] были рассчитаны коэффициенты распыления W диверторных пластин ионами D^+ и Be^{2+} в течение ELM и без ELM. Получено, что средний коэффициент распыления W ионами Be^{2+} $Y_{\text{Be/W}}$ между ELM составляет $\sim 0,08$, а при ELM средние коэффициенты распыления W ионами D^+ и Be^{2+} равны соответственно $Y_{\text{D/W}} \sim 0,014$ и $Y_{\text{Be/W}} \sim 0,57$. Распыление W горизонтальной диверторной пластины при ELM и в промежутке между ELM было оценено по формулам из [10], с использованием рассчитанных коэффициентов распыления и результатов измерений ленгмюровскими зондами плотности потока частиц [25]:

$$\Gamma_{w, \text{ELM}} \approx (\Gamma_{\text{ELM}} - \Gamma_{\text{inter-ELM}})(Y_{\text{D/W}} + 0,005 Y_{\text{Be/W}}) \Delta t f_{\text{ELM}}; \quad (5)$$

$$\Gamma_{w, \text{inter-ELM}} \approx \Gamma_{\text{inter-ELM}} 0,005 Y_{\text{Be/W}}.$$

Для ELM первого типа в разрядах кампании «C30C» на токамаке JET с $\Gamma_{\text{ELM}} = 3 \cdot 10^{23} \text{ с}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$, $\Gamma_{\text{inter-ELM}} = 1 \cdot 10^{23} \text{ с}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$, $\alpha = 87^\circ$, $f_{\text{ELM}} = 30$ Гц, $\Delta t = 2$ мс, где Δt — характерное время изменения со временем потока прилетающих ионов на поверхность, поток распылённого вольфрама при наличии ELM составил $2,4 \cdot 10^{20} \text{ ат./}(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, а между ELM — $4 \cdot 10^{19} \text{ ат./}(\text{м}^2 \cdot \text{с})$. Можно сделать вывод, что при наличии ELM первого типа с частотой $f_{\text{ELM}} = 30$ Гц, рассмотренных в работе, распыление W диверторных пластин уве-

личивается примерно в 7 раз, т.е. распыление при ELM составляет 85% от общего распыления диверторных пластин. В работе [8] измерения интенсивности излучения атомов вольфрама на длине волны WI (400,9 нм) при использовании двух спектроскопических систем на JET показали, что для большинства разрядов на JET количество вольфрама, распылённого во время ELM, по отношению к полной эрозии вольфрама составляет 70—80% [8, рис. 8], что качественно подтверждает результаты моделирования. Таким образом, моделируя движение ионов по предложенной методике, использующей измерения плотности ионного потока на диверторную пластину с помощью ленгмюровских зондов, можно оценить плотность потока распыляемого вольфрама за время воздействия ELM и между ними. Следует отметить, что при концентрации ионов Be^{2+} в налетающем потоке 0,5% вклад ионов Be^{2+} в распыление вольфрамовых диверторных пластин при ELM в 5 раз меньше вклада ионов D^+ , что является несомненным достоинством данного металла в качестве материала для первой стенки в ИТЭР.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе методика аналитической интерпретации параметров плазменного потока на диверторную пластину, измеренных ленгмюровскими зондами, была доработана с учётом изменений параметров плазмы в области пьедестала во время развития гранично-локализованных мод. Это позволило получить хорошо согласующиеся с измерениями временные профили потока ионов и теплового потока, приходящих на поверхность диверторной пластины, при физически обоснованной величине длины магнитной линии от пьедестала до поверхности пластин дивертора L_{con} , соответствующей оценкам для JET с ИТЭР-подобной стенкой. Таким образом, проведённый анализ даёт количественную оценку влияния эффекта деградации параметров плазмы пьедестала во время возникновения ELM на характеристики временной зависимости потока ионов на диверторную пластину. Используя рассчитанные коэффициенты распыления и результаты измерений плотности тока насыщения, проведена оценка распыления W горизонтальной диверторной пластины во время ELM и в промежутке между ними для разрядов в H-моду из экспериментальной кампании «C30C» на токамаке JET с ИТЭР-подобной стенкой. Показано, что рассмотренные в работе ELM первого типа с частотой следования 30 Гц приводят к повышению распыления вольфрамового дивертора примерно в 7 раз относительно уровня распыления в стационарном режиме без ELM, что подтверждается проведёнными ранее измерениями с помощью двух спектрометрических систем на токамаке JET.

Работа выполнена за счёт гранта Российского научного фонда (проект № 18-72-00178).

REFERENCES

1. **Pitts R.A. et al.** — J. Nucl. Mater., 2011, vol. 415, p. S957.
2. **Guillemaut C. et al.** — Plasma Phys. Control. Fusion, 2015, vol. 57, p. 085006.
3. **Gunn J.P. et al.** — Nucl. Fusion, 2017, vol. 57, p. 046025.
4. **Brezinsek S. et al.** — J. Nucl. Mater., 2015, vol. 463, pp. 11—21.
5. **Shimada M. et al.** — Nucl. Fusion, Chapter 1: Overview and Summary, 2007, vol. 47, pp. S1—S17.
6. **Monier-Garbet P. et al.** — Nucl. Fusion, 2005, vol. 45, p. 1404.
7. **Abrams T. et al.** — Nuclear Materials and Energy, 2018, vol. 17, pp. 164—173.
8. **Den Harder N. et al.** — Nucl. Fusion, 2016, vol. 56, p. 02601.
9. **Kallenbach A. et al.** — Plasma Phys. Control. Fusion, 2005, vol. 47, pp. B207—B222.
10. **Borodkina I. et al.** — Nuclear Materials and Energy, 2017, vol. 12, pp. 341—345.
11. **Van Rooij G.J. et al.** — J. Nucl. Mater., 2013, vol. 438, pp. S42—S47.
12. **Borodkina I. et al.** — Phys. Scr., 2017, vol. 170, p. 014065.
13. **Brezinsek S. et al.** — Nucl. Fusion, 2013, vol. 53, p. 083023.
14. **Fundamenski W. et al.** — Plasma Phys. Control. Fusion, 2006, vol. 48, pp. 109—156.
15. **Eich T. et al.** — J. Nucl. Mater., 2009, vol. 390—391, p. 760.
16. **Moulton D. et al.** — Plasma Phys. Control. Fusion, 2013, vol. 55, p. 085003.

17. **Guillemaut C. et al.** — Nucl. Fusion, 2018, vol. 58, p. 066006.
18. **Eckstein W. et al.** — Report IPP, 2002, vol. 9, p. 132.
19. **Borodkina I. et al.** — Contrib. Plasma Phys., 2016, vol. 56, № 6—8, pp. 640—645.
20. **Borodkina I. et al.** — Russian Physics J., 2015, vol. 58, № 4, pp. 438—445.
21. **Pamela S. et al.** — Plasma Phys. Control. Fusion, 2016, vol. 58, p. 014026.
22. **Huysmans G.T.A. et al.** — Plasma Phys. Control. Fusion, 2009, vol. 51, p. 124012.
23. **Leonard A.W.** — Phys. Plasmas, 2014, vol. 21, p. 090501.
24. **Harting D.M. et al.** — J. of Nuclear Materials, 2015, vol. 463, pp. 493—497.
25. **Wiesen S. et al.** — Nucl. Fusion, 2017, vol. 57, p. 066024.
26. **Eckstein W.** — Topics Appl. Physics, 2007, vol. 110, pp. 33—187.

AUTHORS

Borodkina I.E. National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Kashirskoye shosse 31, 115409 Moscow, Russia; IEBorodkina@mephi.ru

Kurnaev V.A. National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Kashirskoye shosse 31, 115409 Moscow, Russia; kurnaev@plama.mephi.ru

Received 14 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. 5—12