УДК 533.951.8

ВЛИЯНИЕ АККУМУЛЯЦИИ ПРИМЕСИ ВОЛЬФРАМА НА УСТОЙЧИВОСТЬ ОМИЧЕСКИХ РАЗРЯДОВ Т-10

*В.А. Крупин¹, И.А. Земцов^{1,2}, Л.А. Ключников¹, М.Р. Нургалиев¹, А.Р. Немец¹,
А.Ю. Днестровский¹, С.А. Грашин¹, Т.Б. Мялтон¹, Д.В. Сарычев¹, Д.С. Сергеев¹,
Н.А. Соловьев¹, А.В. Сушков¹, В.М. Трухин¹, С.Н. Тугаринов¹*

¹НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

²МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

В ходе экспериментальной кампании 2017—2018 гг. на установке Т-10 с вольфрамовыми лимитерами и литиезованной камерой во многих омических разрядах было обнаружено присутствие регулярно повторяющегося циклического процесса, связанного с аккумуляцией примеси вольфрама в центре шнура (W-цикла). Данный процесс возникает по мере накопления вольфрама в разряде и его неоклассического пикирования у оси шнура, что приводит к сильному росту центральных излучательных потерь P_W^{rad} (0) на ионах W. Рост P_W^{rad} (0) вызывает уплощение профиля температуры электронов $T_e(r)$, уменьшение плотности тока плазмы j_{pl} в центре шнура и подавление пилообразных колебаний (ПК). В условиях подавления ПК наблюдается дальнейшее усиление пикирования W у оси шнура, ещё большее вытеснение тока из центра и возникновение «малого» срыва по МГД-моду $m = 2$, приводящего к частичному выбросу из центра шнура тепла, частиц рабочего газа и всех сортов примесей. Восстановление параметров разряда после «малого» срыва сопровождается, как правило, повторной аккумуляцией вольфрама в центре шнура и новым «малым» срывом. Обнаруженные W-циклы могут повторяться многократно за разряд и в конце концов приводить к срыву разрядного тока.

Ключевые слова: токамак, плазма, примеси, аккумуляция, срыв, вольфрам.

THE INFLUENCE OF TUNGSTEN IMPURITY ACCUMULATION ON T-10 OHMIC DISCHARGES STABILITY

*V.A. Krupin¹, I.A. Zemtsov^{1,2}, L.A. Klyuchnikov¹, M.R. Nurgaliev¹, A.R. Nemets¹,
A.Yu. Dnestrovskiy¹, S.A. Grashin¹, T.B. Myalton¹, D.V. Sarychev¹, D.S. Sergeev¹,
N.A. Solovlev¹, A.V. Sushkov¹, V.M. Trukhin¹, S.N. Tugarinov¹*

¹NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

²Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

During the experimental campaign of 2017—2018 the regularly repeated cyclic process (W-cycle) related to the tungsten accumulation in the plasma center is discovered on the T-10 tokamak with tungsten limiters and lithized conditions. This process occurs as the increase of tungsten density and its neoclassic peaking at the center. This results in the rise of central radiation losses P_W^{rad} (0) on W ions. The growth of P_W^{rad} (0) causes the flattening of electron temperature profile $T_e(r)$, the decrease of current density in the central area and the suppression of saw-tooth oscillations (SO). The latter results in addition peaking of W density and even greater displacement of current from the plasma center and as a result causes a «small» disruption by MHD mode $m = 2$ that removes heat and main and all impurity particles from the plasma center. The renewal of discharge parameters after «small» disruption accompanied as a rule by repeated accumulation of tungsten in the plasma center and a new «small» disruption. The detected W-cycles can be repeated many times during the discharge and eventually lead to the disruption of the discharge current.

Key words: tokamak, plasma, impurities, accumulation, disruption, tungsten.

DOI: 10.21517/0202-3822-2019-42-1-95-105

ВВЕДЕНИЕ

В работе методами спектроскопии исследуются процессы поступления, переноса и влияния примеси вольфрама на параметры разрядов Т-10 с омическим нагревом (ОН) в условиях работы установки с кольцевым и рельсовым вольфрамовыми лимитерами. Тот факт, что диверторные пластины ИТЭР планируется выполнять из вольфрама, во многом определяет актуальность данных исследований. Дополнительный интерес к исследованиям вызван тем, что тайлы лимитеров Т-10 изготовлены из вольфрама той же марки, который будет использован для производства диверторных пластин ИТЭР. Результаты исследова-

Рис. 1. Схема расположения W-лимитеров и Li-диафрагмы

меры, покрытыми литием, формировала уровень поступления Li в разряд. Высокие геттерные свойства лития позволили изменять (снижать) в широких пределах уровень лёгких примесей в плазме и проводить исследования на Т-10 в условиях, когда все элементы камеры, взаимодействующие с плазмой, являются металлическими (W, Li).

Вольфрам — наиболее тяжёлая примесь плазмы, чьё содержание в шнуре $c_W = \Sigma n_W/n_e$ обычно составляет 10^{-4} — 10^{-5} . При таком малом его содержании влияние на плотность и эффективный заряд плазмы практически отсутствует. Однако благодаря высокой излучательной способности вольфрама, пропорциональной Z_W^{3-4} , где Z_W — предельный заряд W в плазме ($Z_W \sim 30$ — 35 в условиях Т-10), данная примесь имеет возможность выносить из плазмы большое количество энергии в виде радиационных потерь и тем сильно влиять на профиль электронной температуры, а с ним — на профиль тока и активность в разряде пилообразных колебаний (ПК) и МГД-моды $m = 2$.

Важным инструментом исследования переноса вольфрама и его влияния на параметры разряда Т-10 явилось описание поведения W, измеряемого в эксперименте AXUV-детекторами, в транспортной модели, сформированной на базе кодов STRAHL + ASTRA [5, 6]. С помощью данной модели ранее был успешно описан перенос ионов и ядер He, C, O, Ar, K в плазме Т-10 [7]. Модельное описание поведения вольфрама, позволяющее более детально изучить рассматриваемое явление, можно также отнести к особенностям данной работы, поскольку приведённые исследования ([2, 3]) ограничивались феноменологическим описанием экспериментальных результатов.

Первые результаты наблюдений влияния вольфрама на параметры и устойчивость плазмы в Т-10 приведены в [8]. В данной работе рассмотрен процесс влияния вольфрама на МГД-активность плазмы. Дано описание основных характеристик процесса, условий его возникновения и развития, а также влияния на его формирование параметров омического разряда.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В ходе экспериментальной кампании на Т-10 исследовались поведение примеси вольфрама и её влияние на параметры и стабильность разрядов с различными величинами плотности плазмы, тока и продольного поля при работе с W-лимитерами и Li-диафрагмой.

Конструкция Li-диафрагмы давала возможность изменять её положение в SOL от токовой границы до стенки и тем самым позволяла контролировать степень литиезации разряда. Литий, осаждённый на W-лимитерах и на стенках камеры, за счёт геттерной откачки снижает потоки лёгких примесей (C и O) в разряд, сильно уменьшая величину их концентрации в разряде. Примеси C и O являются основными распылителями материала W-лимитеров, и уменьшение их концентрации резко снижает поступление W в плазму, что регистрируется изменением интенсивности излучения линии атома вольфрама $\lambda_W = 4008 \text{ \AA}$. Уменьшение концентрации ядер примесей C и O снижает величину эффективного заряда плазмы $Z_{эф}$, ослабляя этим процесс неоклассического проникновения ионов W в центр шнура. Суммарным эффектом литиезации разряда становилось резкое снижение концентрации W в центре шнура.

дований поведения примеси вольфрама, выполненные на других установках в омических режимах, представлены в работах [1—4]. Характерные черты поведения вольфрама в плазме и его влияния на параметры и устойчивость разряда оказываются в условиях Т-10 во многом схожими с наблюдавшимися на установках PLT [1] и TEXTOR [2, 3].

Особенностью проводимых на Т-10 исследований поведения вольфрама следует считать присутствие в эксперименте подвижной литиевой CPS-диафрагмы, помещённой в область SOL (рис. 1). Данная диафрагма, выступая в качестве источника лития в разряде Т-10, совместно с элементами ка-

ДИАГНОСТИКИ, ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ

Важной чертой проведённых экспериментов являлось использование полного набора диагностических средств (рис. 2), необходимых для исследования поведения вольфрама и его влияния на параметры разряда, а именно:

Рис. 2. Схема расположения диагностик Т-10

- набора диагностик линейчатого излучения атомов и ионов плазмы для определения источников поступления примесей С, О, W и рабочего газа;
- диагностики тормозного излучения для определения эффективного заряда плазмы $Z_{эф}$;
- активной CXRS-диагностики для определения профилей ионной температуры $T_i(r)$, концентрации ядер углерода $n_{C+6}(r)$ и кислорода $n_{O+8}(r)$;
- болометрической, AXUV- и SXR-диагностики для определения мощности радиационных потерь на лёгких (С, О) и тяжёлых (W) примесях плазмы;
- диагностики профиля температуры электронов $T_e(r)$ из измерений электронно-циклотронного излучения плазмы и диагностики $T_e(0)$ из ППД-измерений спектра излучения плазмы в SXR-области;
- диагностики профиля плотности электронов $n_e(r)$ из интерферометрических измерений с помощью СВЧ- и HCN-лазерного интерферометров.

ТРАНСПОРТНАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследование влияния излучения вольфрама на параметры разряда проводилось с использованием экспериментальных данных и их описания в математической модели. Моделирование переноса атомов и ионов W выполнялось с помощью разработанной ранее и верифицированной для условий Т-10 транспортной модели STRANL + ASTRA. Скоростные коэффициенты ионизации, рекомбинации и перезарядки, входящие в уравнения непрерывности ионов вольфрама, брались из базы данных ADAS [9]. Модель основана на диффузионно-конвективном подходе и учитывает неоклассический и аномальный перенос ионов. В модели используются известные коэффициенты неоклассического переноса, а для коэффициентов аномальной диффузии $D_{ан}(r)$ и скорости аномального пинчевания $V_{ан}(r)$ берутся следующие выражения, полученные в работе [10] и уточнённые в [11]:

$$D_{ан}(r) = 9,2 \times 10^{-4} \frac{I_{пл}^{1,5}(r)}{n_e(r) Z_{эф}(r)}; \quad (1)$$

$$V_{ан}(r) = D_{ан}(r) \frac{\nabla n_e(r)}{n_e(r)},$$

где $D_{ан}(r)$ в м²/с; $V_{ан}(r)$ в м/с; $I_{пл}$ — ток плазмы, кА; $n_e(r)$ — концентрация электронов, 10¹⁹ м⁻³; $Z_{эф}(r)$ — эффективный заряд. Данные выражения позволяют описывать перенос в плазме Т-10 любых типов при-

месей (Ar, K, S, O, W, Fe) [7]. В качестве входных параметров для модели выступают экспериментально измеренные профили температур электронов (T_e) и ионов (T_i), профиль концентрации электронов (n_e), индукция продольного магнитного поля (B_T), ток плазмы (I_{pl}) и геометрия токамака (r, R). В качестве граничных условий в модели выступают потоки лёгких (C, O) и тяжёлых (W) примесей на границе плазменного шнура, а также концентрация нейтральных атомов рабочего газа. Величины данных параметров проверялись на совместную непротиворечивость при расчёте в коде ASTRA. К проверяемым на согласие параметрам относились величины напряжения обхода U_{loop} , радиуса переворота фазы пилообразных колебаний r_s , профили эффективного заряда плазмы $Z_{эф}(r)$ и мощности радиационных потерь на ионах вольфрама $P_W^{rad}(r)$. Критерием непротиворечивости (верификации) экспериментальных данных являлось совпадение экспериментальных параметров с рассчитанными в модели.

В используемой модели $P_W^{rad}(r)$ вычисляется по следующей формуле:

$$P_W^{rad}(r) = n_e(r) L_W^{эф}(r) \sum_i n_i(r), \quad (2)$$

где $\sum n_i(r)$ — профиль полной концентрации ионов вольфрама в плазме n_W ; $L_W^{эф}(r)$ — рассчитанный в корональном равновесии интегральный скоростной коэффициент возбуждения вольфрама [12]. В работе [11] сделан вывод о том, что данный источник значений $L_W^{эф}$ позволяет наиболее точно описать результаты экспериментов на Т-10. В качестве экспериментального значения радиационных потерь были использованы результаты измерения датчиков AXUV. В работе [13] было показано, что в относительно чистых разрядах ($Z_{эф} \leq 3$) излучение в центральной области шнура ($\rho \leq 0,5$) практически полностью формируется ионами вольфрама, что гарантирует применимость (2) для описания экспериментального профиля $P_W^{rad}(r)$.

W-ЦИКЛ

W-цикл обнаруживается в значительном количестве разрядов Т-10 в виде регулярно повторяющегося процесса, вызванного аккумуляцией вольфрама в центре шнура и приводящего к затуханию ПК и расщепке моды $m = 2$ с возникновением «малого» срыва. Характерные признаки W-цикла на различных стадиях его развития наиболее контрастно проявляются на временном ходе сигнала SXR-диагностики (рис. 3), регистрирующей излучение плазмы в области энергии 2—5 кэВ.

Рис. 3. Характерный вид W-цикла в разряде № 71 640 с параметрами $n_e = 3,6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, $I_{pl} = 230 \text{ кА}$, $B_T = 2,3 \text{ Тл}$: а — интенсивность сигнала SXR по центральной хорде; б — поведение центральной температуры $T_e(0)$; в — поведение активности МГД-моды $m = 2$; г — профили мощности радиационных потерь $P_W^{rad}(r)$; д — температура $T_e(r)$ для трёх моментов времени: для 520 мс — временной пунктир и профили $P_W^{rad}(r)$ и T_e (—), для 720 мс (—), для 790 мс (—)

Всего зарегистрировано несколько сотен разрядов с присутствием данного эффекта. В ходе развития W-цикла можно выделить следующие этапы, по многим признакам совпадающие с отмеченными в [2, 3]:

— первый этап (455—670 мс), на котором возникает первоначальное пикирование $Z_{\text{эф}}(r)$ (как будет показано далее, аналогично рис. 7), сопровождается накоплением вольфрама и начальным пикированием его концентрации $n_{\text{W}}(r)$ в центре шнура. Как видно на рис. 3, з, это приводит к исходному слабому обострению профиля радиационных потерь $P_{\text{W}}^{\text{rad}}(r)$, как результату прямой связи $P_{\text{W}}^{\text{rad}}(r) \sim n_{\text{W}}(r)$;

— второй этап (670—715 мс), на котором благодаря дальнейшей пикировке профиля $P_{\text{W}}^{\text{rad}}(r)$ (см. рис. 3, з) в центре шнура реализуется высокая плотность радиационных потерь $P_{\text{W}}^{\text{rad}}(0)$ (до $\sim 0,16$ Вт/см³). Подобные потери энергии из электронного компонента способны вызывать охлаждение центральной величины T_e и приводят к выполаживанию профиля $T_e(r)$ (см. рис. 3, д). В результате профиль плотности тока $j_{\text{pl}}(r) \sim T_e(r)^{1,5}/Z_{\text{эф}}(r)^{0,8}$, где пропорция $j_{\text{pl}}(r) \sim Z_{\text{эф}}(r)^{-0,8}$ является аппроксимацией неоклассической зависимости j_{pl} от $Z_{\text{эф}}$, также уплощается, что формирует величину коэффициента запаса устойчивости на оси шнура $q(0) > 1$, вызывая затухание пилообразных колебаний;

— на третьем этапе (715—820 мс) вследствие затухания ПК наблюдается основное усиление пикирования $n_{\text{W}}(r)$ и $P_{\text{W}}^{\text{rad}}(r)$ (см. рис. 3, з), что вызывает заключительное уширение профиля $T_e(r)$ (см. рис. 3, д), а с ним и профиля $j_{\text{pl}}(r)$. Развитие указанных процессов коррелирует в эксперименте с усилением активности МГД-моды $m = 2$ (см. рис. 3, е). Раскачка моды $m = 2$ завершается «малым» срывом с выбросом из центра всех сортов примесей (в том числе вольфрама), а также снижением абсолютных величин n_e , T_e , T_i и параметра $\gamma = \bar{n}_e Z_{\text{эф}} / I_{\text{pl}}^{1,5}$, характеризующего накопление и пикировку примесей в ОН-разряде [13].

Описанные этапы могут в дальнейшем многократно повторяться в разряде, заканчиваясь, как правило, срывом тока. Таким образом, W-цикл оказывает в целом негативное влияние на основные параметры плазмы, периодически вынося из шнура значительную часть запасённой в нём энергии.

Различные варианты развития W-цикла в разрядах Т-10 показаны на рис. 4. На рис. 4, а показан случай развития W-циклов, первый из которых вызвал «малый» срыв на 350-й мс разряда, после чего аккумуляция вольфрама возобновилась и привела к срыву тока через 350—400 мс разряда. Вариант W-циклов, приводящих к «малым» срывам, возникающим циклично в течение всего разряда, но без срыва тока, показан на рис. 4, б. На рис. 4, в показан вариант, в котором вторичный W-цикл развивается в течение 50 мс и приводит к срыву тока.

Эффектом, отмеченным в [2, 3] и усиливающим процесс аккумуляции W в центре, является подавление термодиффузии вольфрама, обычно препятствующей собиранию W у оси шнура. К уменьшению термодиффузии приводит выполаживание профиля ионной температуры $T_i(r)$ в центральной области шнура, сопровождающее подавление ПК при аккумуляции W. Моделирование данного процесса в условиях Т-10 с учётом экспериментальных данных для двух моментов развития W-цикла до подавления пилообразных колебаний (800 мс) и после их подавления (950 мс)

Рис. 4. Различные варианты развития W-цикла, стрелками указано характерное время развития начального и повторных W-циклов

представлено на рис. 5. Как видно на рис. 5, б, после подавления ПК неоклассический поток иона W^{28+} , присутствующий в центральной половине шнура и приводящий к пинчеванию W в центр, существенно возрастает из-за уменьшения термодиффузии вольфрама. Это подтверждает сделанное в [2, 3] предположение о влиянии эффекта подавления термодиффузии на усиление пикирования W у оси шнура.

Рис. 5. Профили ионных температур (— до подавления ПК, 800 мс; — после подавления ПК, 950 мс) (а) и отношений скорости пинчевания к коэффициенту диффузии для иона W^{28+} (— в присутствии ПК, 800 мс; — ПК подавлены, 950 мс; — — без термодиффузии, — — аномалия, 800 и 950 мс) (б) в разряде № 72 133 в моменты до и после подавления ПК — 800 и 950 мс соответственно. Профили $n_e(r)$ для данных моментов практически одинаковы

Экспериментально установленная в работах [2, 3] граничная величина электронной плотности $n_e = 2,5\text{--}3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, при превышении которой начинался процесс аккумуляции вольфрама в центре шнура, объяснялась пороговым отключением термодиффузионного выброса вольфрама из центра шнура. В условиях Т-10 минимальная величина n_e , с которой начинает наблюдаться W -цикл, значительно ниже — $\sim 1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, что может говорить о влиянии на аккумуляцию вольфрама у оси шнура многих других процессов, помимо эффекта термодиффузии.

Итак, в экспериментах на Т-10 W -цикл проявился в значительном количестве омических литиезованных разрядов (нескольких сотнях за кампанию), в которых параметры плазмы изменялись в следующих диапазонах:

- $Z_{эф} = 1,7\text{--}3,5$;
- ток плазмы $I_{pl} = 100\text{--}300 \text{ кА}$;
- средняя плотность $n_e = (1\text{--}6)10^{13} \text{ см}^{-3}$;
- продольное поле $B_T = 1,7\text{--}2,5 \text{ Тл}$.

УСЛОВИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ W -ЦИКЛА

Анализ обширной базы экспериментальных данных позволил определить условия возникновения и развития W -цикла в плазме Т-10. Основным условием является присутствие в разряде определённого уровня лёгких примесей, обеспечивающего попадание величины эффективного заряда плазмы $Z_{эф}$ в диапазон $1,7 \leq Z_{эф} \leq 3,5$. Нижняя граница данного диапазона определяется необходимостью наличия в плазме достаточного количества распылителей вольфрама (в случае Т-10 — примесей С, О), способных обеспечить достаточно высокий уровень концентрации $n_W(0)$, а с ним и величину радиационных потерь $P_W^{rad}(0)$ из центра шнура. Верхнее ограничение на величину $Z_{эф}$ связано с тем обстоятельством, что при больших значениях $Z_{эф} > 4$ уменьшается степень пикировки профиля

$n_W(r)$ у оси шнура (рис. 6). Действительно, профиль относительной концентрации ионов вольфрама $f_W(r) = n_W(r)/n_W(0)$ может быть представлен выражением $f_W(r) \approx f_e(r)^{Z_W/Z_{\text{эф}}}$, где $f_e(r)$ — профиль относительной концентрации электронов, Z_W — заряд иона вольфрама. Отсюда при больших величинах $Z_{\text{эф}} > 4$ из-за слабой пикировки профиля $n_W(r)$ не достигается необходимая пикированность профиля $P_W^{\text{rad}}(r)$. Эксперименты показали, что слабо локализованные радиационные потери на вольфраме со сколь угодно высоким уровнем мощности $P_W^{\text{rad}}(r)$ оказываются неспособными повлиять на выполаживание параметров $T_e(r)$, $j_{\text{pl}}(r)$ и рост $q(r)$ в центре шнура и потому не приводят к возникновению W-цикла.

Рис. 6. Влияние величины и профиля параметра $Z_{\text{эф}}$ на возникновение W-цикла в ОН-разряде: при $Z_{\text{эф}} < 1,6$, $I_{\text{pl}} = 250$ кА, $n_e \approx 3,8 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$, $\gamma \approx 1,3 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-3} \cdot \text{кА}^{-1,5}$ (а), как и при значениях $Z_{\text{эф}} > 4$, $I_{\text{pl}} = 250$ кА, $n_e \approx 3,8 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$, $\gamma \approx 2 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-3} \cdot \text{кА}^{-1,5}$ (в), при которых примеси практически не пикируются в центре разряда, цикл не реализуется. Средний уровень лёгких примесей $Z_{\text{эф}} \sim 2,5$, $I_{\text{pl}} = 220$ кА, $n_e \approx 1,8 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$, $\gamma \approx 2 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-3} \cdot \text{кА}^{-1,5}$ (б) позволяет обеспечить достаточно высокое накопление вольфрама в разряде и эффективную его пикировку у оси шнура, что приводит к запуску W-цикла

Как видно на рис. 6, б, в диапазоне эффективных зарядов $1,7 \leq Z_{\text{эф}} \leq 3,5$ на выполаживание профиля плотности тока $j_{\text{pl}}(r) \sim T_e(r)^{1,5}/Z_{\text{эф}}(r)^{0,8}$ и развитие W-цикла, помимо уплощения профиля T_e , существенно влияет ещё и обострение профиля $Z_{\text{эф}}$.

Вторым условием появления W-цикла является присутствие в разряде высоких значений параметра $\gamma = \bar{n}_e Z_{\text{эф}} / I_{\text{pl}}^{1,5}$, при которых обеспечивается усиление неоклассического и ослабление аномального переноса вольфрама [7]. Это приводит к ускоренному накоплению W, пикировке профилей $n_W(r)$ и $P_W^{\text{rad}}(r)$ и в результате к ускорению развития W-цикла в разрядах с высокой величиной параметра γ . В работе [4] представлен более простой критерий аккумуляции W в виде отношения n_e/I_{pl} . Используемый нами параметр γ учитывает прямую зависимость эффекта аккумуляции примесей от величины $Z_{\text{эф}}$, более сильную обратную зависимость от роста тока ($1/I_{\text{pl}}^{1,5}$) и в процессе многолетних исследований [7, 10] надёжно описывает поведение широкого набора примесей от He до W в омических разрядах Т-10.

Третье условие связано с особенностью работы токамака в режимах с низкими величинами продольного поля B_T , при которых в эксперименте образуется более плоский профиль $T_e(r)$ с меньшими значениями $T_e(0) \sim B_T^{0,8}$. На такой профиль $T_e(r)$ легче воздействовать пикированными потерями $P_W^{\text{rad}}(r)$, которые в отличие от профиля $T_e(r)$ практически не уменьшают свою пикированность при уменьшении B_T . Отсюда W-цикл, отсутствующий в разрядах Т-10 с большими величинами B_T , сразу проявляется в разрядах с теми же параметрами, но с уменьшенными значениями B_T .

ДИНАМИКА ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ В ПРОЦЕССЕ W-ЦИКЛА

В транспортных кодах ASTRA и STRANL с использованием разработанной транспортной модели [8] была промоделирована динамика изменения профилей различных параметров разряда на разных этапах протекания W-цикла. В качестве входных параметров модели брались следующие экспериментальные значения: $I_{\text{pl}} = 250$ кА, $B_T = 2,4$ Тл, $Z_{\text{эф}} = 1,8$. Профиль ионной температуры $T_i(r)$, полученный из CXRS-измерений, задавался неизменным в течение всего вольфрамового цикла согласно данным эксперимента. Экспериментальные профили плотности $n_e(r)$ и $T_e(r)$ вводились в модель

на трёх этапах цикла: до подавления пилообразных, когда вольфрам ещё не начал пикироваться в центре (650-я мс разряда на рис. 3), сразу после подавления ПК (720-я мс) и непосредственно перед малым срывом (800-я мс разряда).

Для указанных моментов времени в модели были подобраны мощности источников лёгких (С, О) и тяжёлых (W) примесей на границе шнура, которые позволили описать экспериментальные значения напряжения обхода, эффективного заряда, а также профиль интегральных радиационных потерь, в основном, в дальнем ультрафиолете (EUV), измеряемых с помощью AXUV-диагностики, и профиль интенсивности излучения спектральной линии иона углерода CVI с длиной волны 529,1 нм. В результате расчётов на стадии затухания ПК были описаны экспериментальные положения радиуса r_s и соответствующие изменения профиля $q(r)$.

Результаты моделирования, представленные на рис. 7, показывают, что в процессе W-цикла происходит пикирование излучения вольфрама в центре разряда, что приводит к снижению T_e в этой области. Возникающее уплощение профиля температуры электронов ведёт к выносу тока из центра и поднимает центральное значение коэффициента запаса устойчивости до значений $q > 1$. Время расчётного достижения $q > 1$ совпадает с временем подавления неустойчивости внутреннего срыва в эксперименте.

Рис. 7. Результаты моделирования динамики профилей параметров разряда $T_e(r)$: • — эксперимент; — — расчёт (а), $P_{\text{rad}}(r)$ (б), $q(r)$ (в) и j_{pl} (г) на разных этапах развития W-цикла: — этап 1, — этап 2, — этап 3 (см. рис. 3)

Хорошее описание экспериментальной динамики r_s свидетельствует о непротиворечивости и надёжности абсолютных значений и профилей всех экспериментальных параметров, вводимых в модель. Это обстоятельство позволяет в дальнейшем перейти к полномасштабному моделированию W-цикла, включающему описание экспериментальной динамики параметров $Z_{\text{эф}}(r, t)$, $P_{\text{W}}^{\text{rad}}(r, t)$, $T_e(r, t)$ и т.д., в процессе развития W-цикла, которое предполагается выполнять с учётом конкретных механизмов затухания ПК и развития моды $m = 2$.

ВЫВОДЫ

Переход с С-лимитеров на W-лимитеры с литиезацией камеры привёл к следующим основным изменениям.

В случае, когда значения эффективного заряда попадают в диапазон $1,7 \leq Z_{\text{эф}} \leq 3,5$, а также при увеличении параметра $\gamma = \bar{n}_e Z_{\text{эф}} / I_{\text{pl}}^{1,5}$ и уменьшении величины поля B_T в разрядах Т-10 наблюдается регулярное возникновение циклического процесса, связанного с аккумуляцией у оси шнура примеси вольфрама — так называемого вольфрамового цикла.

Причина возникновения W-цикла связана с неоклассическим проникновением в центр плазмы ионов W и их пикированием у оси шнура, что вызывает пикирование мощности радиационных потерь на вольфраме в центре и соответствующее уплощение профилей $T_e(r)$, $j_{\text{pl}}(r)$ с подавлением пилообразных колебаний. Возникающая после затухания ПК усиленная пикировка радиационных потерь на W приводит к ещё большему вытеснению тока из центра и возникновению «малого» срыва по моде $m = 2$.

«Малый» срыв, которым завершается W-цикл, вызывает выброс всех примесей и, заодно, потерю 30—50% энергозапаса плазмы. Периодическое повторение в разряде «малых» срывов заканчивается, как правило, срывом разрядного тока.

Литиезация разряда фактически стимулирует возникновение W-циклов, обеспечивая попадание величины эффективного заряда плазмы в диапазон $1,7 \leq Z_{\text{эф}} \leq 3,5$, обычно труднодоступный без литиезации. Отметим, что в условиях чисто металлических диафрагменных элементов (W и Li) стабильность разрядов из-за уменьшения срывов по моде $m = 2$ вследствие меньшего охлаждения края шнура излучением примесей С и О существенно улучшается, в то же время стабильность шнура, обусловленная ростом активности моды $m = 2$ вследствие развития W-цикла, заметно ухудшается.

Результаты моделирования в коде ASTRA изменений радиуса переворота фазы пилообразных колебаний r_s в процессе развития W-цикла указывают на достаточную точность измерения и совместимость всех параметров плазмы, регистрируемых в эксперименте.

Данное обстоятельство позволяет в дальнейшем перейти к описанию в модели всех экспериментальных параметров, подвергающихся изменению в W-цикле, путём введения в модель механизмов затухания ПК и развития моды $m = 2$.

Авторы выражают благодарность доктору Ральфу Дюксу за предоставление транспортного кода STRAHL и консультации по его использованию.

Экспериментальные данные получены при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 14-22-00193). Моделирование выполнено при поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-32-00100.

REFERENCES

1. **Hawryluk R.J. et al.** The effect of current profile evolution on plasma-limiter interaction and the energy confinement time. — Nucl. Fusion., 1979, vol. 19, № 10, pp. 1307—1317.
2. **Tokar M.Z. et al.** Nature of high-Z impurity accumulation in tokamaks. — Nucl. Fusion., 1997, vol. 37, № 12, pp. 1691—1708.
3. **Rapp J. et al.** Transport studies of high-Z elements in neon edge radiation cooled discharges in TEXTOR-94. — Plasma Phys. Controlled Fusion, 1997, vol. 39, № 10, pp. 1615—1634.
4. **Philipps V. et al.** Comparison of tokamak behaviour with tungsten and low-Z plasma facing materials. — Plasma Phys. Controlled Fusion, 2000, vol. 42, № 12B, p. B293.
5. **Dux R.** STRAHL. User Manual Technical Report IPP 10/30 IPP. Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, 2006.
6. **Pereverzev G., Yushmanov P.** ASTRA Automated System for transport Analysis. Technial Report IPP, 5/98 IPP Max-Planck-Istitut für Plasmaphysik, 2002.

7. **Krupin V. et al.** Impurity transport in T-10 plasmas with ohmic heating. — Plasma Physics and Controlled Fusion, 2018, vol. 60, № 11, p. 115003.
8. **Zemtsov I., Krupin V. et al.** — In: 45th EPS Conf. on Plasma Phys., 2018, P4.1086.
9. **Summers H.P., O'Mullane M.G.** Atomic Data and Modelling for Fusion: the ADAS Project AIP Conference Proceedings. — AIP, 2011, pp. 179—187.
10. **Krupin V. et al.** — In: 12th EPS Conf. on Plasma Physics. Budapest, 1985, pp. 207—210.
11. **Zemtsov I., Krupin V., Nurgaliev M., Klyuchnikov L., Nemets A., Dnestrovskij A., Sarychev D.** — Problems At. Sci. Technol., Ser. Thermonuclear Fusion, 2017, vol. 40, pp. 29—35.
12. **Post D.E., Jensen R.V., Tarter C.B. et al.** Steady-state radiative cooling rates for low-density, high-temperature plasmas. — Atomic Data and Nuclear Data Tables, 1977, vol. 20, № 5, pp. 397—439.
13. **Krupin V., Nurgaliev M., Klyuchnikov L. et al.** — Nuclear Fusion, 2017, vol. 57, p. 066041.

AUTHORS

Krupin V.A. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; Krupin_VA@nrcki.ru

Zemtsov I.A. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; N.E.Bauman MSTU, 2-ya Baumanskaya str. 5, 105005 Moscow, Russia; zemtsov_ia@nrcki.ru

Klyuchnikov L.A. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; lklyuchnikov@list.ru

Nurgaliev M.R. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; maxim.nurgaliev@gmail.com

Nemets A.R. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; Nemets_AR@nrcki.ru

Dnestrovskiy A.Yu. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia

Grashin S.A. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; SAGrashin@nrcki.ru

Myalton T.B. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; Myalton_TB@nrcki.ru

Sarychey D.V. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; Saryche_DV@nrcki.ru

Sergeev D.S. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia

Solovev N.A. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; etheras@ya.ru

Sushkov A.V. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; Sushkov_AV@nrcki.ru

Trukhin V.M. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; trukhinv@gmail.com

Tugarinov S.N. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia

Received 4 December 2018

Revised 16 December 2018

Accepted 18 December 2018

Problems of Atomic Science and Technology

Ser. Thermonuclear Fusion, 2019, vol. 42, issue 1, pp. 95—105