

УДК 533.9

## ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ПЕРЕНОСА ВОЛЬФРАМА В ПЛАЗМЕ ТОКАМАКА T-10

*М.Р. Нургалиев<sup>1</sup>, В.А. Крупин<sup>1</sup>, Л.А. Ключников<sup>1</sup>, А.Р. Немец<sup>1</sup>, И.А. Земцов<sup>1,2</sup>, А.Ю. Днестровский<sup>1</sup>,  
Д.В. Сарычев<sup>1</sup>, В.С. Лисица<sup>1</sup>, С.А. Грашин<sup>1</sup>, Д.В. Рыжак<sup>1</sup>, Д.С. Сергеев<sup>1</sup>, Н.А. Мустафин<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

<sup>2</sup>Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Работа посвящена изучению переноса вольфрама в плазме токамака T-10. Рассмотрен процесс аккумуляции вольфрама в центре плазмы в ОН-режимах и его зависимость от параметров  $n_e$ ,  $I_p$ ,  $Z_{\text{эф}}$ . В плазме с  $Z_{\text{эф}} \approx 1$ —1,5 наблюдаются пикированные профили концентрации вольфрама  $n_W(r)$ . В разрядах, загрязнённых лёгкими примесями ( $Z_{\text{эф}} \approx 3$ —4), вольфрам в плазме в основном накапливается интегрально без существенного обострения профиля  $n_W(r)$  относительно профиля плотности электронов  $n_e(r)$ . В условиях литиезованной камеры T-10 в плазме с  $Z_{\text{эф}} \approx 1$ —1,5 наблюдаются на порядок более низкие концентрации вольфрама по сравнению с плазмой, загрязнённой лёгкими примесями. Устранение негативной аккумуляции вольфрама возможно путём введения дополнительного ЭЦР-нагрева (ЭЦРН). При центральном ЭЦРН профиль концентрации вольфрама уплощается, а величина его концентрации в центре уменьшается в  $\sim 10$  раз на фоне увеличения поступления атомов вольфрама в разряд в  $\sim 4$  раза.

**Ключевые слова:** токамак, вольфрам, примеси, перенос.

## FIRST EXPERIMENTAL RESULTS OF TUNGSTEN TRANSPORT INVESTIGATIONS IN THE T-10 TOKAMAK PLASMA

*M.R. Nurgaliev<sup>1</sup>, V.A. Krupin<sup>1</sup>, L.A. Klyuchnikov<sup>1</sup>, A.R. Nemets<sup>1</sup>, I. A. Zemtsov<sup>1,2</sup>, A.Yu. Dnestrovskij<sup>1</sup>,  
D.V. Sarychev<sup>1</sup>, V.S. Lisitsa<sup>1</sup>, S.A. Grashin<sup>1</sup>, D.V. Ryzhak<sup>1</sup>, D.S. Sergeev<sup>1</sup>, N.A. Mustafin<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

<sup>2</sup>Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

The investigations of tungsten transport in T-10 plasma is presented in the current paper. The process of tungsten accumulation in OH discharges and its dependence on parameters  $n_e$ ,  $I_p$ ,  $Z_{\text{eff}}$  are discussed. Peaked tungsten density profiles  $n_W(r)$  are observed in plasmas with  $Z_{\text{eff}} \approx 1$ —1.5. In plasmas with  $Z_{\text{eff}} \approx 3$ —4, W accumulation is mainly integral with no profile peaking with regard to electron density  $n_e(r)$ . Lower densities of W are observed in discharges with lithized T-10 vacuum vessel in comparison with plasma contaminated with light impurities. The disposal of W accumulation is produced by auxiliary ECRH input. During the central ECRH the tungsten density profile flattens with the central density drop off by  $\sim 10$  times together with W source increase up to 4 times.

**Ключевые слова:** tokamak, tungsten, impurity, transport.

DOI: 10.21517/0202-3822-2017-40-2-36-41

## ВВЕДЕНИЕ

Одновременно с сооружением установки ИТЭР (экспериментального термоядерного реактора на базе токамака) продолжают экспериментальные и теоретические исследования физических процессов, способных существенно повлиять на параметры его плазмы. Одним из направлений таких исследований является изучение свойств переноса примесей в плазме установок токамак. Собственные примеси способны оказывать негативное влияние на эффективность работы токамака-реактора путём разбавления термоядерного топлива лёгкими примесями и снижения температуры в зоне реакции из-за высокой излучательной способности тяжёлых примесей. Данные эффекты усугубляются наблюдающейся тенденцией к аккумуляции примесей в центре шнура, которая достигает наибольшей степени в разрядах с улучшенным удержанием и максимальными значениями параметров  $\beta_p$  и  $\tau_E$ .

В современных установках токамак в качестве материалов первой стенки часто применяются углерод и вольфрам. На токамаке T-10 в течение длительного времени использовались углеродные лимитеры (кольцевой и рельсовый). Однако в экспериментальной кампании 2015—2016 гг. они были заменены на аналогичные вольфрамовые. Дополнительно был установлен подвижный литиевый лимитер [1]. Замена материала лимитеров позволила провести исследования поведения вольфрама в плазме с омическим и ЭЦРН, а также сравнить его с полученными ранее зависимостями для поведения в плазме T-10 средних (аргона Ar и калия K) [2] и лёгких (углерода C и кислорода O) [3, 4] примесей.

### ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Токамак Т-10 является установкой лимитерной конфигурации с круглым сечением и следующими параметрами: большой радиус  $R = 1,5$  м, малый радиус  $a = 0,3$  м, тороидальное поле  $B_t \leq 2,5$  Тл, ток  $I_p \leq 350$  кА, средняя плотность  $\bar{n}_e = (0,5—7)10^{19} \text{ м}^{-3}$ , мощность ЭЦРН  $P_{EC} \leq 3$  МВт.

Диагностика вольфрама осуществляется при помощи измерений интегральных радиационных потерь в абсолютных величинах. С этой целью на Т-10 установлена линейка из 16 коллимированных AXUV-детекторов, которые регистрируют профили интегрального линейчатого излучения ионов всех примесей во всём сечении шнура. Поступление в разряд вольфрама оценивается по интенсивности линии WI 4008 Å, измеряемой по хорде наблюдения, направленной на внутренние тайлы кольцевого лимитера, а также с помощью системы, сканирующей пространственное излучение линии WI 4008 Å в сечении В (рис. 1).

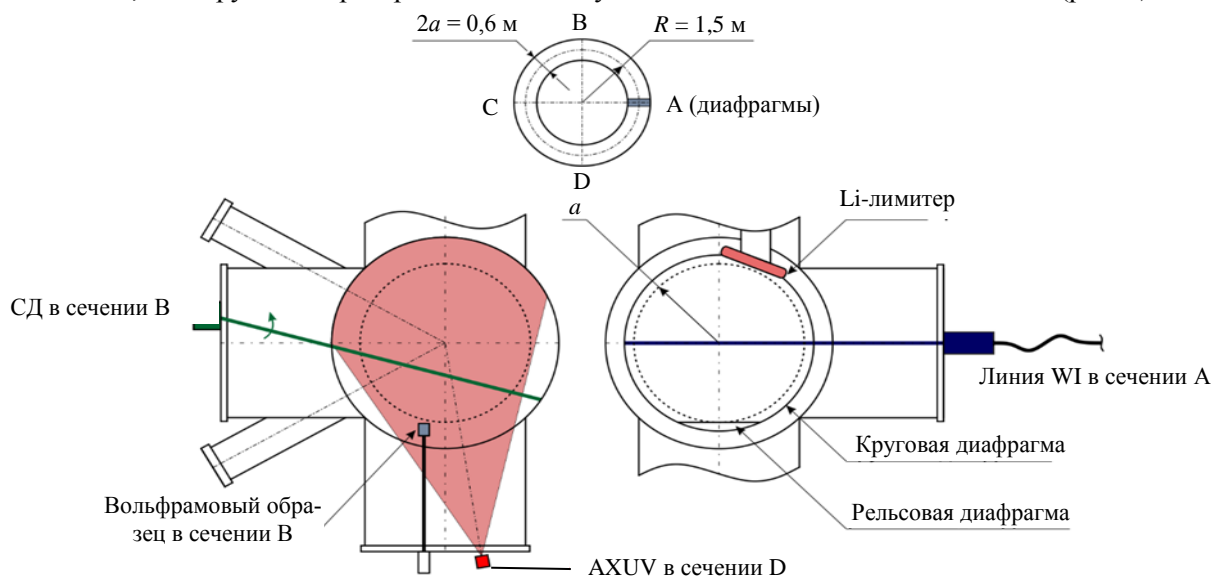


Рис. 1. Схема расположения диагностик токамака Т-10

Обоснованием к использованию профилей интегрального излучения ионов вольфрама для исследования транспортных свойств вольфрама является присутствие относительных концентраций ионов вольфрама  $f_{WZ} = n_{WZ}/\Sigma n_{WZ}$  на радиусах их коронального равновесия в шнура. Для условий установки Т-10 данное обстоятельство было подробно исследовано в работе [6]. Также необходимо было установить, насколько надёжно свечение вольфрама выделяется на фоне общего излучения всех примесей, регистрируемого интегральной диагностикой AXUV, и в какой зоне шнура оно локализовано. Для этого в плазму в сечении В на радиус  $r \approx 0,3$  м вводился вольфрамовый образец, являющийся копией тайла рельсового лимитера. Введение образца приводило к увеличению потоков вольфрама в плазму и к росту суммарных потоков вольфрама в разряд с вольфрамового образца и основной вольфрамовой диафрагмы.

Как видно на рис. 2, а, введение вольфрамового образца сопровождается заметным увеличением радиационных потерь из центральной зоны шнура ( $r \leq 20$  см). Наблюдаемая разница между профилями

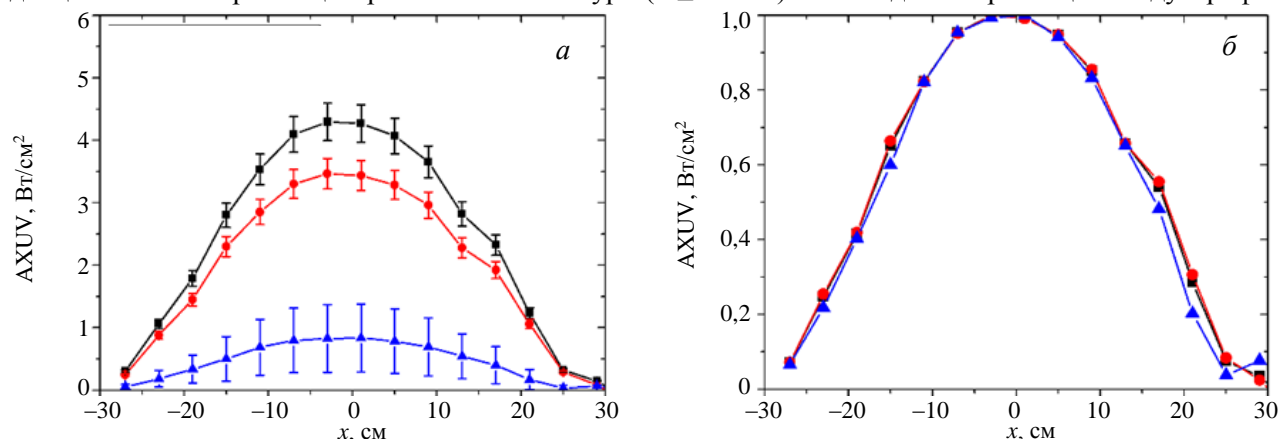


Рис. 2. Хордовые профили радиационных потерь, измеренные диагностикой AXUV в разрядах с  $I_p = 300$  кА,  $\bar{n}_e = 2,2 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ : а — профили в абсолютных единицах; б — профили, нормированные на центральную хорду; ■ — с вольфрамовым образцом; ● — без вольфрамового образца; ▲ — разность  $\Delta$

свечения плазмы с образцом и без него позволяет оценить зону локализации свечения ионов вольфрама в шнуре. Для разряда с параметрами  $I_p = 300$  кА,  $\bar{n}_e \approx 2,2 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$  размер зоны такой локализации составляет  $r \leq 15\text{--}20$  см. Как показано далее, именно в этой зоне происходит интенсивное пикирование вольфрама. Следует отметить, что форма профилей свечения AXUV с вольфрамовым образцом и без него хорошо совпадает с формой разностного профиля внутри указанной области шнура (рис. 2, б).

### АККУМУЛЯЦИЯ ВОЛЬФРАМА В ПЛАЗМЕ Т-10

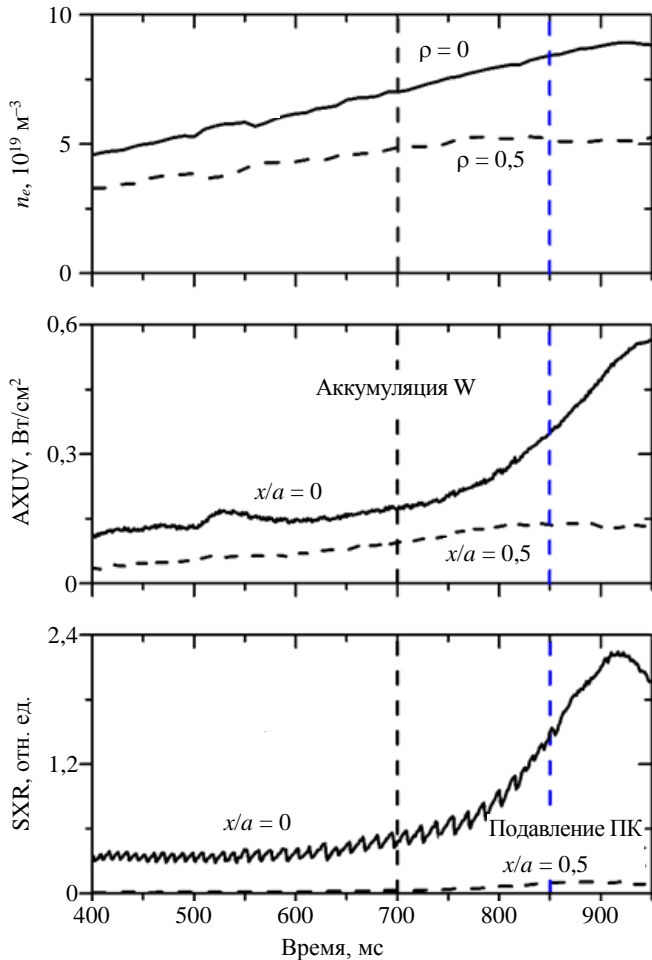


Рис. 3. Аккумуляция вольфрама в разряде № 67 993 с  $I_p = 150$  кА,  $\bar{n}_e = 5,2 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$

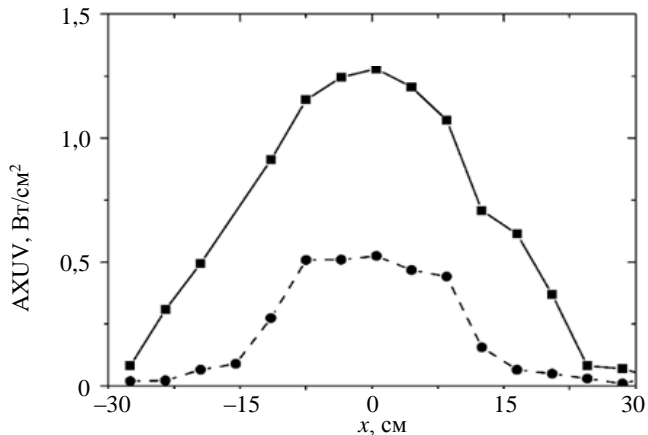


Рис. 4. Хордовые профили радиационных потерь, измеренные диагностикой AXUV: № 67 866 (■, без лития) ( $I_p = 220$  кА,  $\bar{n}_e = 2,8 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ ,  $Z_{эф} \approx 4$ ) и № 67 929 (●, с литием  $\times 10$ ) ( $I_p = 220$  кА,  $\bar{n}_e = 2,2 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ ,  $Z_{эф} \approx 1,1$ )

Эксперименты показали, что в омических разрядах Т-10 наблюдаются существенно более пикированные у оси шнура профили радиационных потерь по сравнению с разрядами с С-лимитером. Рост излучения в центре связан прежде всего с процессом аккумуляции ионов вольфрама в центре шнура. В настоящей работе аккумуляция вольфрама рассматривается в виде двух взаимосвязанных процессов: накопления вольфрама (роста содержания вольфрама  $n_w/n_e$  без заметного обострения профиля  $n_w(r)$  и увеличения пикированности профиля  $n_w(r)$  относительно профиля электронов).

Анализ экспериментальных данных показывает, что процесс аккумуляции вольфрама наиболее ярко выражен в разрядах с малым током, большой плотностью и высоким  $Z_{эф}$ . Данный экспериментальный факт свидетельствует о существовании общих зависимостей от параметров разряда переноса ионов вольфрама и лёгких примесей, удержание которых, как показано в [4], улучшается с ростом параметра  $\gamma = \bar{n}_e Z_{эф} / I_p^{1,5}$ .

Как показано на рис. 3, в разряде с предельной плотностью плазмы наблюдаются увеличение концентрации вольфрама в центре шнура и, соответственно, интенсивный рост излучения, которое, по всей видимости, приводит к охлаждению центра плазмы и уплощению профиля плотности тока. Последнее вызывает подавление пилообразных колебаний и, как следствие, дополнительное обострение профиля концентрации вольфрама и его радиационных потерь.

Наличие на Т-10 подвижного литиевого лимитера позволяет контролировать содержание лёгких примесей в плазме и тем самым провести сравнение поведения вольфрама в разрядах с разными значениями  $Z_{эф}$ . Как показано на рис. 4, величина радиационных потерь, измеренных диагностикой AXUV, по центральной хорде в  $\sim 25$  раз меньше в чистой плазме с  $Z_{эф} \approx 1,1$ . С учётом температурной зависимости интегральных скоростных коэффициентов возбуждения вольфрама [7] можно говорить о сни-

жении концентрации вольфрама в центре чистой плазмы в  $\sim 10\text{--}20$  раз. Более того, сравнение профилей концентрации вольфрама  $n_W(r)$  показывает, что в плазме с  $Z_{\text{эф}} \geq 3$  реализуются более широкие профили  $n_W(r)$ , чем в чистых разрядах с литиезованной камерой (рис. 5).

Уменьшение концентрации вольфрама может быть объяснено зависимостью коэффициента аномальной диффузии плазмы от параметров разряда. Как было впервые показано на Т-10 [2], величина аномальной диффузии снижается с увеличением параметра  $Z_{\text{эф}}$ . Таким образом, в плазме с большими величинами  $Z_{\text{эф}} \geq 3$  аномальные потоки примесей, направленные наружу и стремящиеся расширить профиль  $n_W(r)$  до профиля  $n_e(r)$ , оказываются сравнимыми по величине с неоклассическими потоками, вызывающими аккумуляцию примеси в центре плазмы. Однако в плазме с высоким содержанием лёгких примесей, где преобладают примесь-примесные столкновения, происходит снижение неоклассического пинчевания, задаваемого отношением [8]

$$\frac{V_{\text{neo}}^Z}{D_{\text{neo}}^Z} = \frac{Z}{Z_d} \left( \frac{\nabla n_d}{n_d} + \frac{H}{K} \frac{\nabla T_i}{T_i} \right), \quad (1)$$

где  $V_{\text{neo}}^Z$ ,  $D_{\text{neo}}^Z$  — неоклассический коэффициент диффузии примеси с зарядом  $Z$ ,  $Z_d = 1$  заряд дейтонов;  $n_d$  — концентрация дейтонов;  $H$  и  $K$  — коэффициенты, зависящие от  $n_z Z^2 / n_d Z_d^2$  и столкновительности ионов  $v_i^*$ . В случае плазмы с высоким  $Z_{\text{эф}}$  в выражении (1) следует учитывать примесь-примесные столкновения и заменить  $Z_d$  на заряд доминирующей лёгкой примеси с  $Z > 1$ . Иными словами, уменьшается соотношение  $V_{\text{neo}}^Z / D_{\text{neo}}^Z$ , а вместе с ним и пикирование профилей концентрации примесей.

Можно заключить, что наблюдаемая аккумуляция вольфрама в плазме Т-10 носит неоклассический характер. Для подтверждения данного вывода было проведено описание указанных эффектов в транспортном коде STRANL, представленное в работе [6].

### ПОДАВЛЕНИЕ АККУМУЛЯЦИИ ВОЛЬФРАМА ПРИ ЭЦРН

Возможность использования ЭЦРН для предотвращения аккумуляции примесей неоднократно демонстрировалась на многих установках (см., например, [3, 9—12]). Исследования показывают, что при включении ЭЦРН наблюдаются увеличение коэффициентов аномального переноса плазмы, разрушение неоклассической аккумуляции примесей в центре шнура и уплощение профилей концентрации примесей до профиля плотности электронов.

На Т-10 удаление вольфрама сопровождается изменением хордовых профилей радиационных потерь, регистрируемых болометрами и детекторами AXUV. Как показано на рис. 6, происходят быстрый спад излучения плазмы в центре и его рост на периферии. При этом возникают ски-

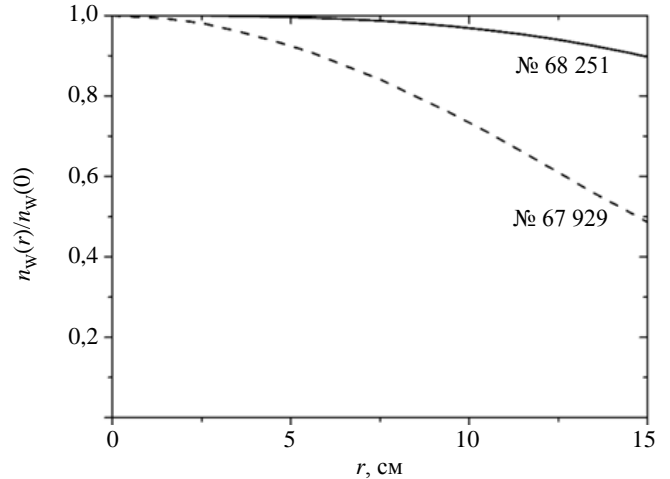


Рис. 5. Сравнение профилей концентрации вольфрама в чистой и грязной плазме: № 67 929 ( $I_p = 220$  кА,  $\bar{n}_e = 2,2 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ ,  $Z_{\text{эф}} \approx 1,1$ ) и № 68 251 ( $I_p = 220$  кА,  $\bar{n}_e = 2,7 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ ,  $Z_{\text{эф}} \approx 3,2$ )

Однако в плазме с высоким содержанием лёгких примесей, где преобладают примесь-примесные столкновения, происходит снижение неоклассического пинчевания, задаваемого отношением [8]

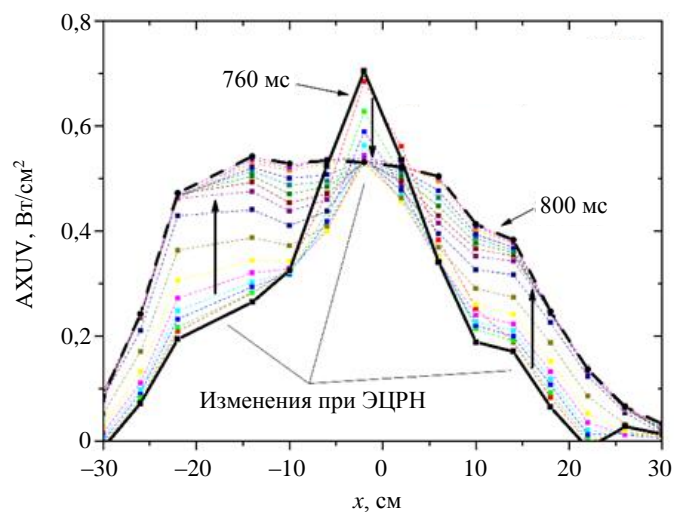


Рис. 6. Изменение хордовых профилей радиационных потерь после включения ЭЦРН на 760 мс разряда № 68 041 ( $I_p = 180$  кА,  $\bar{n}_e = 4,3 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ )

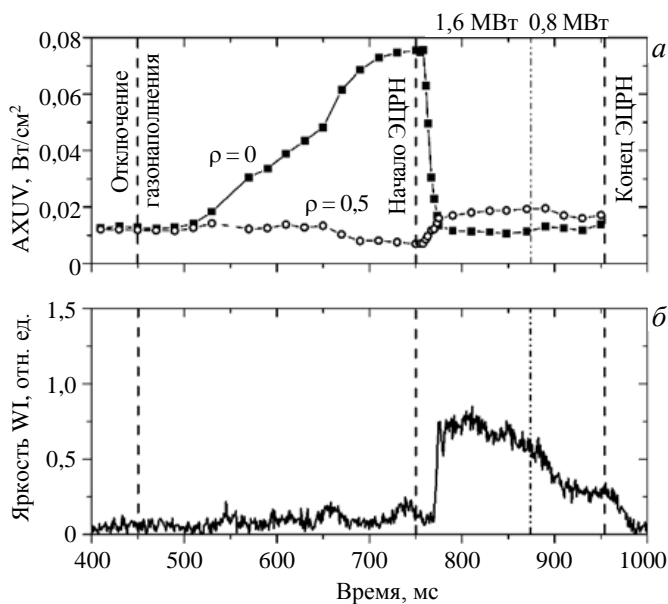


Рис. 7. Плотность мощности радиационных потерь при ЭЦРН сильно падает в центре (а) и слабо вырастает на периферии шнура (б) одновременно с увеличением яркости линии W1 4008 Å в разряде № 68 086 ( $I_p = 220$  кА,  $\bar{n}_e = 4,5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ )

нированные радиальные профили радиационных потерь (рис. 7). Такой значительный спад радиационных потерь в центре обеспечен уходом из него излучающих ионов вольфрама. Процесс удаления вольфрама протекает на фоне значительно роста свечения линии W1 (4008 Å), которое свидетельствует о многократном увеличении поступления вольфрама в плазму с поверхности вольфрамового лимитера при ЭЦРН.

Эксперимент показывает, что в процессе ЭЦРН содержание вольфрама в центре падает примерно в 10 раз, профиль радиационных потерь уплощается. Учитывая увеличение поступления вольфрама в 3—4 раза, можно заключить, что эффективность удаления вольфрама из центра плазмы составляет ~30—40, в то время как у лёгких примесей такое соотношение ~10—20 [4]. Таким образом, вольфрам удаляется из плазмы эффективнее лёгких примесей даже с учётом разброса в величинах скоростных коэффициентов интегрального возбуждения ионов вольфрама [13].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получены первые результаты по исследованию переноса вольфрама в омических и ЭЦР-режимах работы токамака T-10. В омических разрядах вольфрам, как и ожидалось, сильно аккумулируется (т.е. накапливается и пикируется) в центре плазменного шнура. Процесс имеет неоклассическую природу и в ОН-режимах с плотностью  $n_e \geq 2 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$  и током  $I_p \leq 250$  кА заканчивается подавлением пилообразных колебаний вследствие постепенной аккумуляции вольфрама у оси и пикировки радиационных потерь. Наблюдаются схожие зависимости характеристик удержания лёгких, средних и тяжёлых примесей плазмы T-10 от параметра  $\gamma = \bar{n}_e Z_{\text{эф}} / I_p^{1.5}$ . Однако для уточнения деталей подобных зависимостей необходимы более подробные исследования.

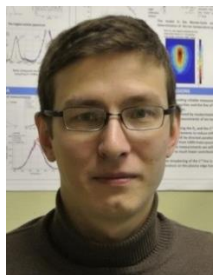
Эффективным способом удаления вольфрама из плазмы в условиях T-10 является литиезация камеры, в результате которой концентрация вольфрама в центре снижается более чем в 10 раз. Введение дополнительного ЭЦРН также приводит к выносу вольфрама из центра. В разрядах с предельной аккумуляцией вольфрама это уменьшение может достигать ~10 раз.

Работа выполнена за счёт гранта Российского научного фонда № 14-22-00193. Эксперименты с литиевым лимитером выполнены при поддержке Госкорпорации «Росатом» (контракт № Н.4х.241.9Б.17.1011).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sarychev D.V. et al. — In: 26th IAEA Fusion Energy Conf. Kyoto, 2016, OV/4—5.
2. Krupin V.A. et al. — In: 12th EPS Conf. on Plasma Physics. Budapest, 1985, p. 207—210.
3. Klyuchnikov L. et al. — In: 25th IAEA Fusion Energy Conf. St. Petersburg, 2014, EX/P1—44.
4. Nurgaliev M. — In: 43rd EPS Conf. on Plasma Physics. Leuven, 2016, P2. 069.
5. Klyuchnikov L.A. et al. — Review of Scientific Instruments, 2016, vol. 87, p. 053506.
6. Земцов И.А. и др. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2017 (в печати).
7. Demura A. et al. — Atoms, 2015, vol. 3, p. 162—181.
8. Hinton F.L., Hazeltine R.D. — Review of Modern Physics, 1976, vol. 48, № 2, Part I, p. 239—308.
9. Tanabe T. et al. — J. of Nuclear Materials, 2000, vol. 283—287, p. 1128—1133.
10. Neu R. et al. — Plasma Phys. Control. Fusion, 2002, vol. 44, p. 811—826.

11. Sertoli M. et al. — Plasma Phys. Control. Fusion, 2011, vol. 53, p. 035024.  
 12. Hong J. et al. — Nucl. Fusion, 2015, vol. 55, p. 063016.  
 13. Demura A., Kadomtsev M., Lisitsa V., Shurygin V. — Atoms, 2015, № 3, p. 162—181.



Максим Ринатович Нурғалиев, инженер; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия



Вадим Александрович Крупин, в.н.с., ветеран атомной энергетики и промышленности; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия



Леонид Александрович Ключников, инженер; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия  
 lklyuchnikov@list.ru



Антон Ролланович Немец, м.н.с.; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия  
 Nemets\_AR@nrcki.ru



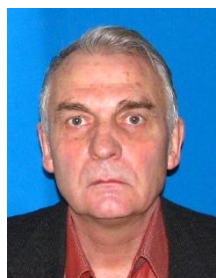
Иван Александрович Земцов, инженер; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия



Алексей Юрьевич Днестровский, ведущий инженер, к.ф.-м.н.; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия



Дмитрий Валентинович Сарычев, с.н.с.; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия



Валерий Степанович Лисица, начальник лаборатории, д.ф.-м.н., профессор; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия  
 vlisitsa@yandex.ru



Сергей Анатольевич Грашин, с.н.с., ветеран атомной энергетики и промышленности; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия  
 SAGrashin@nrcki.ru



Дмитрий Владимирович Рыжаков, н.с.; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия  
 ryzhakovdv@gmail.com



Дмитрий Сергеевич Сергеев, научный сотрудник; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия



Никита Александрович Мустафин, н.с.; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия  
 nikitamustafin@gmail.com

Статья поступила в редакцию 2 февраля 2017 г.

Вопросы атомной науки и техники.

Сер. Термоядерный синтез, 2017, т. 40, вып. 2, с. 36—41.