

УДК 533.9.082

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕСНОГО СОСТАВА ПЛАЗМЫ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ С УГЛЕРОДНЫМ, ВОЛЬФРАМОВЫМ И ЛИТИЕВЫМ ЛИМИТЕРАМИ НА T-10

*А.Р. Немец¹, В.А. Крупин¹, Л.А. Ключников¹, М.Р. Нургалиев¹, В.И. Тройнов^{1,2}, И.А. Земцов^{1,2},
И.С. Образцов¹, Д.С. Сергеев¹*

¹НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

²Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Работа посвящена исследованиям примесного состава плазмы T-10 во время экспериментальных кампаний 2014—2016 гг., в течение которых углеродный лимитер установки был заменён на вольфрамовый и был установлен подвижный литиевый лимитер. В данных экспериментах величина эффективного заряда плазмы определялась из интенсивности тормозного континуума и CXRS-измерений. Суммарная концентрация ионов вольфрама в шнура оценивалась из интенсивности излучения, регистрируемого с помощью AXUV. Поступление в плазму лёгких примесей (C, N, O, Li), а также атомов вольфрама оценивалось из абсолютных измерений профилей линейчатого излучения. Эксперимент показал, что применение лития в качестве материала лимитера позволяет значительно снизить поступление лёгких примесей в разряд, а также уменьшить распыление вольфрамовой диафрагмы. При этом концентрация ядер лития в шнура не достигает величин, измеримых CXRS-диагностикой T-10 (0,3—0,5% от плотности плазмы).

Ключевые слова: диагностика плазмы, спектры излучения плазмы, $Z_{\text{эф}}$, токамак.

STUDY OF PLASMA IMPURITIES COMPOSITION IN THE EXPERIMENTS WITH CARBON, TUNGSTEN AND LITHIUM LIMITERS ON T-10

*A.R. Nemets¹, V.A. Krupin¹, L.A. Klyuchnikov¹, M.R. Nurgaliev¹, V.I. Troynov^{1,2}, I.A. Zemtsov^{1,2},
I.S. Obraztsov¹, D.S. Sergeev¹*

¹NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

²Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

This paper is devoted to research of the T-10 plasma impurity composition during experimental campaigns 2014—2016, when carbon limiter was replaced by tungsten one and a movable lithium limiter was installed. In these experiments, the effective charge of the plasma was determined from the bremsstrahlung intensity and from CXRS measurements. The total concentration of tungsten ions in the column was estimated from the intensity of the radiation detected by AXUV. The source of light impurities (C, N, O, Li), as well as of tungsten atoms was estimated from absolute measurements of line emission profiles. The experiment showed that the use of lithium as a limiter material can significantly reduce the flow of light impurities into the discharge, and also reduce the dispersion of the W-diaphragm. At the same time, the concentration of lithium nuclei in the column does not reach values measurable by CXRS diagnostics of T-10 (0.3—0.5% of the plasma density).

Key words: plasma diagnostics, spectra of plasma, Z_{eff} , tokamak.

DOI: 10.21517/0202-3822-2017-40-2-23-28

ВВЕДЕНИЕ

Интерес к экспериментам с вольфрамовым лимитером на T-10 обусловлен выбором вольфрама в качестве материала диверторных пластин и придиверторных областей (baffle and dome) установки ИТЭР [1]. Для исследования поведения вольфрама в плазме T-10 углеродные лимитеры (круговой и рельсовый) были полностью заменены вольфрамовыми. Значительное количество углеродных плёнок, накопившихся за время работы установки с углеродными лимитерами на стенках камеры, было подвергнуто механической чистке, однако полностью избавиться от поступления углерода и его соединений в разряд не удалось. Кроме того, в значительной степени в плазме присутствовала примесь кислорода. Для снижения поступления лёгких примесей в плазму на многих установках в качестве геттера используется литий [2—4]. В 2016 г. на T-10 были проведены эксперименты с литиезатором новой конструкции, представляющим собой подвижную Li-диафрагму [5]. Целью данной работы являлись

измерение уровня лёгких примесей в плазме при смене материала лимитеров и оценка эффективности использования лития в качестве геттера лёгких примесей.

СИСТЕМЫ СБОРА И РЕГИСТРАЦИИ ИЗЛУЧЕНИЯ

Установка Т-10 является токамаком с круглым сечением и имеет следующие параметры: большой радиус $R = 1,5$ м, радиус рельсового лимитера $a = 0,3$ м, радиус круговой диафрагмы $0,335$ м, тороидальное поле $B_t \leq 2,5$ Тл, ток плазмы $I_p \leq 350$ кА, средняя плотность электронов $\bar{n}_e = (0,3—7)10^{19}$ м⁻³.

Измерения электронной плотности $n_e(r)$ проводятся 8-канальным HCN-лазерным и 8-канальным СВЧ-интерферометром. Электронная температура $T_e(r)$ измеряется многоканальной ЕСЕ-диагностикой, а также одноканальной диагностикой спектров в SXR-области на базе ППД. Профили ионной температуры $T_i(r)$ и концентрации ядер лёгких примесей измеряются CXRS-диагностикой одновременно в девяти точках по сечению шнура [6]. Для измерений профилей эффективного заряда плазмы $Z_{эф}(r)$ из интенсивности тормозного излучения применяется комплекс спектроскопического оборудования, описанный в работе [7]. Для проведения измерений спектров линейчатого излучения плазмы в видимой области и временного хода интенсивности линий основных лёгких примесей плазмы Т-10, а также для оценки поступления в разряд атомов вольфрама по интенсивности линии W I 400,8 нм, данный комплекс был дополнен следующими спектроскопическими системами:

— тремя монохроматорами МДР-2 (дифракционные решётки 1200 штр./мм, дисперсия 20 А/мм) с детекторами ФЭУ-39А, измеряющими интенсивность свечения линий O II (441,5 нм), N II (399,5 нм) и Li II (548,5 нм). Излучение собирается световодами без оптики, расположенными в экваториальном диагностическом патрубке и направленными на внутреннюю часть круговой диафрагмы. При наиболее часто используемом раскрытии щелей МДР-2 на 0,6 мм спектральный диапазон регистрации систем составляет 12 А, что является вполне достаточным для измерения интенсивности отдельно стоящих ярких спектральных линий. Через усилители У7-6 сигналы с ФЭУ передаются на 16-канальный АЦП Insys, работающий с частотой 1 МГц. Временное разрешение системы регистрации не превышает 10 мкс;

— двумя монохроматорами МДР-23 (дифракционные решётки 1200 штр./мм, дисперсия 13 А/мм) с детекторами PIXIS 1300В (1340×1300 пикселей размером 20×20 мкм). При раскрытии входной щели на 50 мкм спектральное разрешение систем составляет ~1 Å. Большой размер CCD-матриц обеспечивает регистрацию участка спектра шириной 25 нм. Одна из систем была настроена на длину волны 486,1 нм в области линии D_β. На втором выходе монохроматора установлен ФЭУ-39А для записи временного хода интенсивности линии D_β в базу данных DASTools. Вторая система используется для снятия различных участков спектра в диапазоне ~400—900 нм. Квантовая эффективность CCD-камер превышает 90% в области от 500 до 700 нм. Наиболее часто используемое время экспозиции камер составляет 100 мс;

— монохроматором МДР-23 с детектором Proscan HS101H (512×512 пикселей размером 24×24 мкм) и ФЭУ-39А (на втором выходе монохроматора). Данный монохроматор чаще всего используется для измерений спектра в области линии W I (400,8 нм) и вывода временного хода интенсивности данной линии в базу данных DasTools. Также на данной системе проводятся измерения молекулярного излучения плазмы из придиафрагменной области. Для исследования заселённости молекул дейтерия по колебательным и вращательным уровням используется участок спектра в диапазоне от 595 до 630 нм с молекулярными полосами 0—0, 1—1, 2—2 и 3—3 ($v'—v''$) α-системы Фулхера $d^3\Pi_u—a^3\Sigma_g$. Спектральное разрешение системы при открытии входной щели на 30 мкм составляет ~0,8 Å. Время экспозиции 50—100 мс. Сбор излучения осуществляется через линзу $d/f = 1/2$ и кварцевый световод длиной 30 м, сечением 2×5 мм.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

На рис. 1, *a* представлен спектр излучения плазмы в диапазоне длины волны 390—415 нм после установки вольфрамовых лимитеров. Наблюдаемое соотношение интенсивностей линий рабочего газа и примесей свидетельствует о значительном поступлении в плазму таких элементов, как углерод, азот,

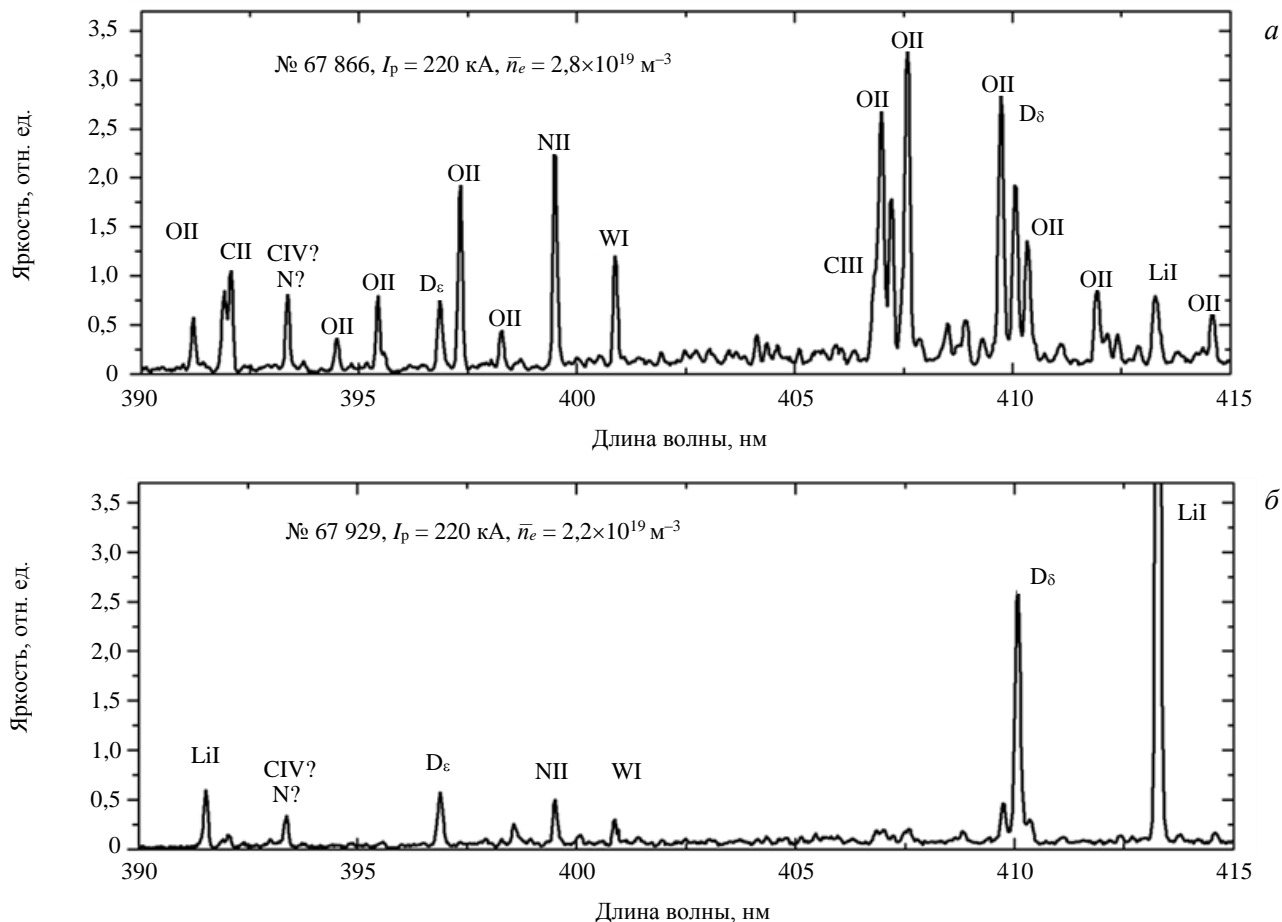


Рис. 1. Спектр излучения плазмы Т-10 в диапазоне длины волны 390—415 нм до проведения литиезации (*a*) и после введения в действие Li-лимитера (*б*)

кислород, дающих существенный вклад в $Z_{эф}$. Для сравнения на рис. 1, *б* представлен спектр в том же диапазоне длин волн после введения в действие Li-лимитера, используемого в данных экспериментах в качестве литиезатора камеры. Как видно на рисунке, в спектре литиезованной плазмы доминируют линии рабочего газа и лития при практическом отсутствии линий кислорода и углерода и одновременном значительном снижении интенсивности линии 400,8 нм атома вольфрама. Уменьшение свечения линии WI 400,8 нм (см. рис. 1) наблюдается в эксперименте, несмотря на увеличение температур T_e и T_i на границе литиезованной плазмы. Этот эффект может быть обусловлен осуществлением литием функции защитного покрытия W-лимитера, а также уменьшением эффективности распыления вольфрама дейтерием в чистой плазме по сравнению с высокой эффективностью распыления многозарядными ионами примесей в грязной плазме [8].

Указанный эффект уменьшения поступления в разряд лёгких примесей и вольфрама длительно сохраняется при поддержании высокого вакуума в камере и периодической ночной очистке камеры с помощью индукционного разряда и прогревов. После экспозиции литиезованной камеры на атмосфере уровень лёгких примесей в плазме установки, даже после длительных тренировок, значительно возрастает, что связано, видимо, с глубоким окислением остающегося на стенках камеры лития.

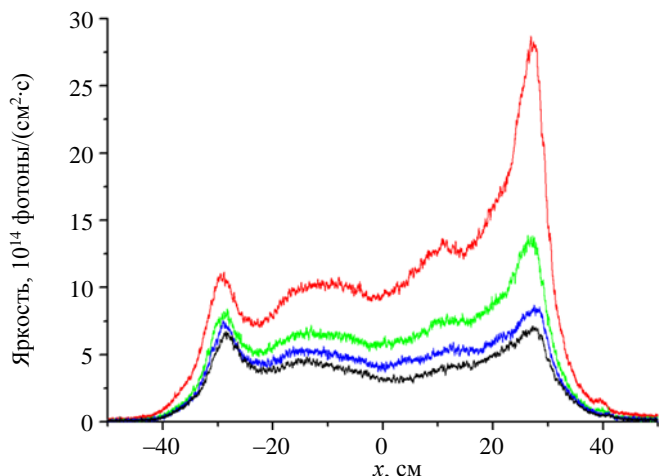


Рис. 2. Хордовые профили свечения линии иона лития LiII (548,5 нм) в зависимости от режима работы литиезатора (r_{Li} — глубина введения литиезатора по малому радиусу токамака, см; T — температура прогрева, °С): № 67 909 500 (—) — 750 мс, $r_{Li} = 32$ см, $T = 370$ °С; № 67 906 500 (—) — 800 мс, $r_{Li} = 32$ см, $T = 290$ °С; № 67 905 550 (—) — 750 мс, $r_{Li} = 33$ см; № 67 903 550 (—) — 750 мс, $r_{Li} = 43$ см

На рис. 2 представлены хордовые профили свечения линии иона лития LiII (548,5 нм) в зависимости от режима работы литиезатора. Наибольшее поступление лития в плазму достигалось при прогреве Li-лимитера свыше 300 °С. Рис. 3, а отражает постепенное снижение яркости линий ионов ОII (397 нм) и СII (392 нм) при нарастании яркости свечения линии атомов лития LiI (413 нм), которая характеризует величину поступления лития в разряд и его концентрацию на элементах камеры. Рис. 3, б демонстрирует снижение концентрации ядер С и О с увеличением интенсивности линии LiI, измеренное с помощью CXRS-диагностики. Этот эффект сопровождается соответствующим уменьшением эффективного заряда плазмы, определяемого по интенсивности тормозного излучения (рис. 3, в).

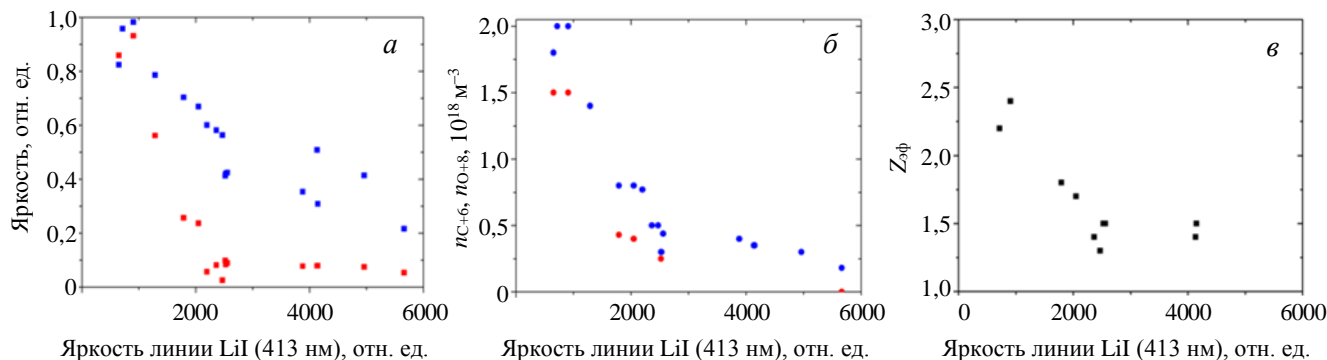


Рис. 3. Зависимость яркости линий СII (392 нм) (■) и ОII (397 нм) (■) (а), концентрации ядер С (●) и О (●) в центре шнура, измеренная CXRS-диагностикой, (б), и величины эффективного заряда плазмы $Z_{эф}$, определённой из интенсивности тормозного излучения (в), от яркости линии LiI (413 нм). Омический режим, ток плазмы $I_p = 220$ кА, средняя концентрация электронов $\bar{n}_e = (2-2,5)10^{19} \text{ м}^{-3}$

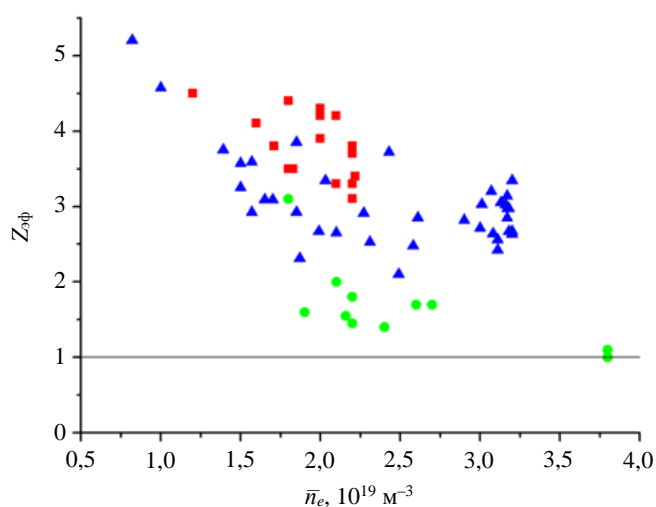


Рис. 4. Зависимость эффективного заряда плазмы $Z_{эф}$, определённого из интенсивности тормозного излучения в омическом режиме, от средней электронной плотности для разрядов с током 220 кА при различных материалах лимитеров: ▲ — углеродный лимитер, 2014 г.; ■ — вольфрамовый лимитер, 8—19 апреля 2016 г.; ● — вольфрамовый и литиевый лимитеры, 26 апреля — 3 мая 2016 г.

Измерения $Z_{эф}$ из интенсивности тормозного континуума проводились в широком диапазоне параметров разряда. В таблице представлены величины средних плотностей, при которых измерялась величина $Z_{эф}$ для различных токов плазмы и материалов лимитеров. На рис. 4 представлены результаты измерений зависимостей эффективного заряда плазмы от средней электронной плотности при токе 220 кА. Как видно на рисунке,

Параметры разрядов, в которых проводились измерения эффективного заряда $Z_{эф}$ из интенсивности тормозного излучения

I_p , кА	$\bar{n}_e/10^{19}, \text{ м}^{-3}$		
	С	W	W + Li
150			1,9—4,4
180	0,8—3,5	1,8—1,9	3,3—3,4
200	1,6—3,3	1,7—2,0	
220	0,8—3,2	1,2—2,2	1,8—3,8
250	1,2—4,2	1,3—2,9	
300	2,1—4,5	2,2—3,1	3,0—5,5

при переходе от углеродного к вольфрамовому лимитеру уровень лёгких примесей незначительно возрос, что может быть связано как с длительной экспозицией вакуумной камеры Т-10 на атмосфере, так и с недостаточным отжигом вольфрамовых лимитеров перед установкой в вакуумную камеру.

После проведения литиезации уровень $Z_{эф}$ существенно снизился, что подтверждается независимыми измерениями, проведёнными CXRS-диагностикой, которые демонстрируют следующие уменьшения процентного содержания ядер лёгких примесей: С (4% → 0,3%), N (0,4% → 0,1%) и О (3% → < 0,1%). Высокая эффективность сорбции лёгких примесей небольшим литиезованным участком камеры определяется тем, что на Т-10 литиезованный участок располагается в сечении основного W-лимитера, т.е. в той области шнура, где из-за рециклинга примесей на W-лимитере присутствует в десятки раз бóльшая концентрация атомов и молекул лёгких примесей, чем в среднем по обходу тора.

Отметим, что возникающее при литиезации камеры поступление атомов самого лития в омическом режиме (ОН) и при электронно-циклотронном резонансном нагреве (ЭЦРН) не приводит к появлению в плазме концентрации ядер лития на уровне, измеримом CXRS-диагностикой Т-10 (0,3% от n_e). Одной из причин отсутствия ядер лития в плазме является малость абсолютных величин потоков лития в разряд. Описание в модели [9] профиля экспериментальной яркости линии LiII (548,5 нм) позволяет установить величину потока атомов лития в разряд на уровне $\sim 1 \cdot 10^{19} \text{ с}^{-1}$, при которой концентрация ядер лития в центре шнура составляет менее 0,3—0,5% от плотности плазмы [10]. Эта величина совпадает с оценкой потока лития из распыления с учётом коэффициентов распыления, приведённых в работе [11]. В качестве основного механизма поступления лития рассматривался процесс его распыления ионами D^+ , поскольку температура Li-диафрагмы в эксперименте не превышала 500 °С, что исключает значимый вклад процесса испарения в поступление лития в разряд [12]. Это объясняет отсутствие измеримого CXRS-сигнала на спектре линии LiIII (516,7 нм) в разрядах с литиезованной камерой и практическое отсутствие вклада от литиевых потоков, поступающих в разряд, в измеряемую величину $Z_{эф}$.

Важным является тот факт, что измеримую концентрацию ядер лития не удаётся обнаружить при помощи CXRS-диагностики даже в условиях ЭЦР-нагрева мощностью до 2 МВт. При этом наблюдается рост свечения линий атомов и гелиеподобных ионов лития от 1,5 до 3 раз в зависимости от параметров разряда (рис. 5), что свидетельствует об увеличении поступления лития в плазму. Как было показано в работе [13], включение ЭЦР-нагрева на Т-10 должно не только компенсировать увеличение поступления лития эффектом выноса лёгких примесей, но и приводить к уменьшению концентрации ядер лития в центре относительно исходного омического уровня.

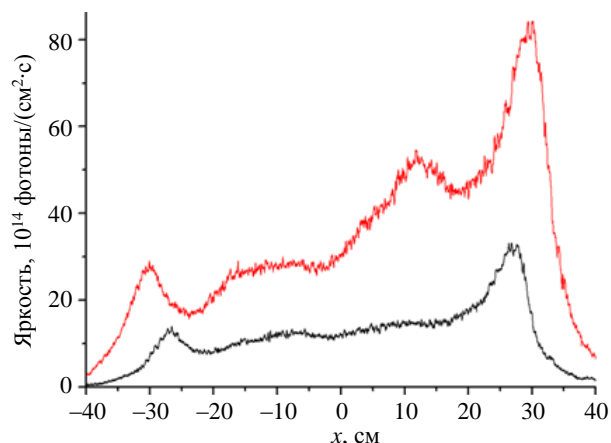


Рис. 5. Хордовые профили свечения линии LiII (548,5 нм): в омической стадии разряда (— 250—450 мс) и после включения ЭЦР-нагрева (— 550—800 мс). № 67 921, $I_p = 220 \text{ кА}$, $\bar{n}_e = 2,2 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На токамаке Т-10 проведены измерения уровня лёгких примесей при переходе от углеродного лимитера к вольфрамовому, а также при введении в разряд подвижного литиезатора. Эксперименты показали, что литий практически не даёт вклада в измеряемую величину $Z_{эф}$ в разрядах с литиезованной камерой. В то же время в омических режимах Т-10 уровень $Z_{эф}$ при литиезации снижается с ~ 3 —4 до ~ 1 —1,5. Одновременно уменьшается поступление вольфрама в 2—4 раза. Таким образом, литий позволяет значительно снизить уровень лёгких примесей в плазме, проявляя качества геттера. Кроме того, литий уменьшает поступление вольфрама в омических режимах, выступая в качестве защитного покрытия элементов вольфрамовой диафрагмы, а также за счёт уменьшения распыления материала лимитера в условиях более чистой плазмы. Указанные положительные эффекты длительно сохраняются при поддержании высокого вакуума в камере. После открытия литиезованной камеры на атмосферу, несмотря

на последующую длительную очистку камеры, уровень лёгких примесей в разрядах Т-10 значительно возрастает, что может быть связано с глубоким окислением находящегося на стенках камеры лития.

Спектроскопические измерения выполнены за счёт гранта Российского научного фонда (проект № 14-22-00193). Работа установки Т-10 обеспечена при поддержке Госкорпорации «Росатом» (контракт № Н.4х.241.9Б.17.1011).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

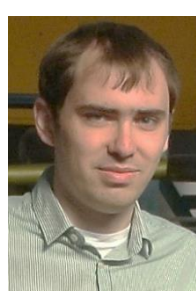
1. **ITER Physics Basis.** — Nuclear Fusion, 1999, vol. 39, № 12, p. 2561.
2. **Mansfield D.K.** — In: SNL, Albuquerque, NM, Nov. 13—17, 2000.
3. **Hogan J.T., Bush C.E., Skinner C.H.** — Nucl. Fusion, 1997, vol. 37, p. 705—711.
4. **Chowdhuri M.B. et al.** — Plasma Science and Technology, 2013, vol. 15, № 2, p. 123—128.
5. **Lyublinski I.** — In: 26th IAEA Fusion Energy Conf. Kyoto, 2016. EX/P8-37.
6. **Klyuchnikov L.A. et al.** — Review of Scientific Instruments, 2016, vol. 87, p. 053506.
7. **Крупин В.А. и др.** — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2016, вып. 1, с. 81—94.
8. **Войцень В.С.** — Физика плазмы, 1989, т. 15, вып. 1, с. 12—23.
9. **Dux R.** STRAHL User Manual. — Technical Report IPP 10/30, IPP Max-Planck Institut für Plasmaphysik, 2006.
10. **Krupin V.A. et al.** — Nuclear Fusion, 2017 (to be published).
11. **Allain J.P. et al.** — J. Nucl. Mater., 2001, vol. 290—293, p. 180—184.
12. **Мирнов С.В., Евтихин В.А.** — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2005, вып. 4, с. 3—18.
13. **Klyuchnikov L. et al.** — In: 25th IAEA Fusion Energy Conf. St. Petersburg, 2014. EX/P1-44.



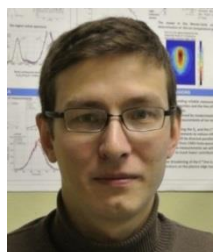
Антон Ролланович Немец, м.н.с.; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия
Nemets_AR@nrcki.ru



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



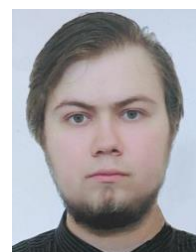
Леонид Александрович Ключников, инженер; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия
lklyuchnikov@list.ru



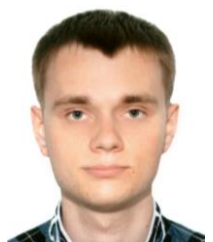
Максим Ринатович Нурғалиев, инженер; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия
maxim.nurgaliev@gmail.com



Владислав Игоревич Тройнов, инженер; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия



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



Иван Сергеевич Образцов, техник; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия



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

Статья поступила в редакцию 19 января 2017 г.
Вопросы атомной науки и техники.
Сер. Термоядерный синтез, 2017, т. 40, вып. 2, с. 23—28.