

04.2

Измерение мощности радиационных потерь и эффективного заряда плазмы на токамаке Глобус-М2

© Е.А. Тюхменева¹, Н.Н. Бахарев¹, В.И. Варфоломеев¹, В.К. Гусев¹, Н.С. Жильцов¹, Е.О. Киселев¹, Г.С. Курскиев¹, В.Б. Минаев¹, Ю.В. Петров¹, Н.В. Сахаров¹, А.Д. Сладкомедова², А.Ю. Тельнова¹, С.Ю. Толстяков¹, П.Б. Щеголев¹

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

² York Plasma Institute, University of York, York, U.K.

E-mail: tuxmeneva@gmail.com

Поступило в Редакцию 17 июля 2020 г.

В окончательной редакции 9 сентября 2020 г.

Принято к публикации 26 сентября 2020 г.

Представлены результаты измерения мощности радиационных потерь P_{rad} и эффективного заряда плазмы Z_{eff} в условиях магнитного поля до 0.7 Т и тока по плазме до 300 кА для широкого диапазона электронной плотности, впервые полученные на токамаке Глобус-М2. Анализ результатов показал, что в токамаке Глобус-М2 доля радиационных потерь относительно вкладываемой мощности снизилась по сравнению с полученной на установке Глобус-М, а измеренные профили мощности P_{rad} имели сильный провал в центре. Кроме того, при повышении плотности электронов наблюдается уменьшение значений Z_{eff} .

Ключевые слова: термоядерный синтез, диагностика плазмы, эффективный заряд плазмы, радиационные потери.

DOI: 10.21883/PJTF.2021.02.50537.18471

На модернизированном токамаке Глобус-М2 (УНУ „Сферический токамак Глобус-М, входит в состав ФЦКП „Материаловедение и диагностика в передовых технологиях“, уникальный идентификатор проекта RFMEF162119X0021) [1–3] первые значительные результаты с использованием всех важнейших диагностик были получены во время экспериментальной кампании в 2019 г. [4]. Измерения проводились при следующих параметрах: тороидальное магнитное поле B_T до 0.7 Т, ток по плазме I_p до 300 кА, электронная плотность n_e до 10^{20} м^{-3} , температура электронов T_e до 1.5 keV, температура ионов T_i около 1 keV. В настоящей работе представлены результаты первых измерений мощности радиационных потерь P_{rad} и эффективного заряда плазмы Z_{eff} . Пространственное распределение мощности радиационных потерь P_{rad} и величина эффективного заряда Z_{eff} дают важную информацию о поступлении и переносе примесей в плазме токамака.

Первые эксперименты по нагреву и удержанию плазмы в токамаке Глобус-М2 были проведены при $B_T = 0.7 \text{ Т}$ и $I_p = 300 \text{ кА}$. Основной характеристикой степени загрязненности плазмы примесными элементами является величина эффективного заряда Z_{eff} , который определяется формулой [5]:

$$Z_{eff} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{\sum_i n_i Z_i^2}{\sum_i n_i Z_i}, \quad (1)$$

где n_i — концентрация ионного компонента плазмы с зарядом Z_i .

Для измерения эффективного заряда плазмы на токамаке Глобус-М2 была создана диагностика [6], основанная на измерении мощности тормозного излучения

$P_{br}(Z_{eff})$ в ближнем ИК-диапазоне, где отсутствует интенсивное линейчатое излучение, а рекомбинационное излучение в условиях измерений пренебрежимо мало. Кроме того, использовались данные диагностики томсоновского рассеяния (ТР) [7].

Регистрация тормозного излучения проводится с помощью фильтрового монохроматора, состоящего из объектива, формирующего область наблюдения в виде квазицилиндрического объема диаметром $d = 3 \text{ см}$, интерференционного фильтра для выделения необходимого спектрального интервала и приемника — лавинного фотодиода Hamamatsu S11519-30, оснащенного малошумящим усилителем. Хорда наблюдения, вдоль которой регистрируется P_{br} , проходящая в экваториальном сечении камеры токамака (рис. 1, а), идентична хорде зондирования диагностики ТР [7], что в условиях тороидальной симметрии позволяет наиболее точно определять распределения T_e и n_e в объеме наблюдения. Поскольку линия наблюдения направлена в область патрубка на противоположной стенке, вклад отраженного излучения оказывается значительно меньше, чем в том случае, когда в поле зрения оказывается графитовая поверхность.

По измеренному значению P_{br} [W] и зависимостям $T_e(R)$ [eV] и $n_e(R)$ [м^{-3}] от большого радиуса R [m] в предположении $\langle Z_{eff} \rangle(R) = \text{const}$ в области наблюдения рассчитывается средний по объему наблюдения эффективный заряд плазмы $\langle Z_{eff} \rangle$ [6]:

$$\langle Z_{eff} \rangle = \frac{P_{br}}{1.5 \cdot 10^{-23} \langle g_{ff} \rangle \int_V \int_{\Delta\lambda} \Omega \frac{n_e^2}{\lambda^2 \sqrt{T_e}} \exp\left(-\frac{hc}{\lambda T_e}\right) dV d\lambda}. \quad (2)$$

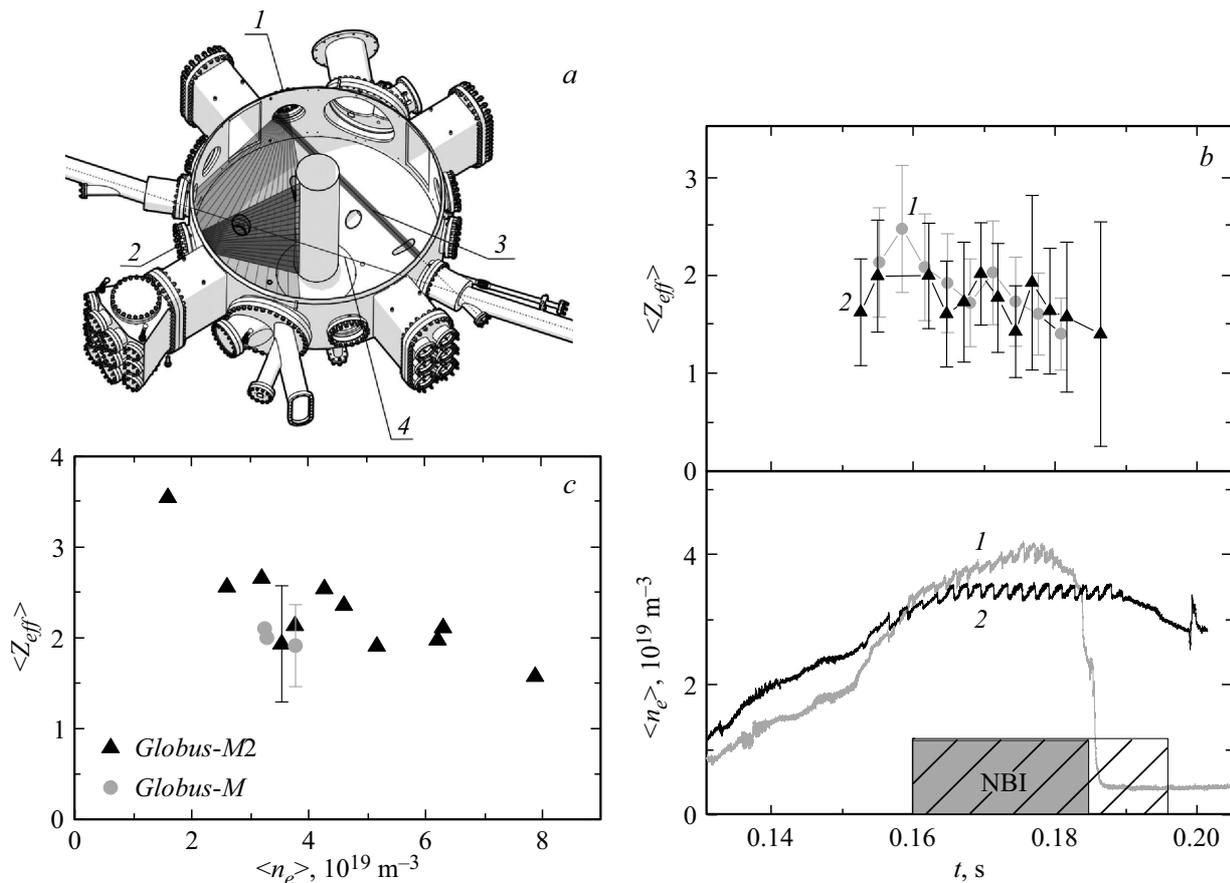


Рис. 1. *a* — геометрия диагностик Z_{eff} [3] и P_{rad} [8] на токамаке Глобус-М2: 1 — фотодиодная матрица 16×16 , 2 — фотодиодная линейка 1×24 , 3 — линия наблюдения диагностики Z_{eff} , 4 — лазер диагностики ТР; *b* — эволюция $\langle Z_{eff}(t) \rangle$ и средней плотности электронов $\langle n_e(t) \rangle$ в разрядах #37069 (Глобус-М) (1) и #38098 (Глобус-М2) (2); *c* — зависимость эффективного заряда плазмы $\langle Z_{eff} \rangle$ от плотности электронов $\langle n_e \rangle$.

Интегрирование производится по длине волны λ [nm] на спектральном промежутке $\Delta\lambda$ [nm] и по объему V [m³], в котором регистрируется тормозное излучение. Телесный угол Ω [sr], в котором происходит сбор излучения, зависит от расстояния $l(R)$ [m] до монохроматора, так как объем наблюдения квазицилиндрический.

Спектральный интервал 1020–1041 nm был выбран на основе данных, полученных на токамаке Глобус-М2 с помощью обзорного спектрометра AvaSpec-2048, регистрирующего спектры излучения плазмы в диапазоне 200–1100 nm.

На рис. 1, *b* приведено сравнение временной эволюции $\langle Z_{eff}(t) \rangle$ и средней плотности электронов $\langle n_e(t) \rangle$ в разрядах токамаков Глобус-М и Глобус-М2. Разряды были выбраны таким образом, чтобы электронные плотности были одинаковыми. Параметры выбранных разрядов токамаков Глобус-М/Глобус-М2 (#37069/#38098 соответственно) были следующими: ток по плазме $I_p = 180 \text{ kA}/300 \text{ kA}$, тороидальное магнитное поле $B_T = 0.4 \text{ T}/0.7 \text{ T}$, мощность дополнительного нагрева нейтральным пучком $P_{NBI} = 650 \text{ kW}/850 \text{ kW}$, энергия частиц пучка $E_{NBI} = 26 \text{ keV}/28 \text{ keV}$.

Погрешность определения эффективного заряда в основном зависит от точности измерения плотности электронов n_e и температуры T_e с помощью диагностики ТР [4], а также от погрешности измерения мощности тормозного излучения, которая обусловлена преимущественно неопределенностью вклада излучения, отраженного от стенки, ошибкой определения коэффициента усиления лавинного фотодиода и спектральной характеристики фильтра. В связи с особенностью геометрии регистрации P_{br} на токамаке Глобус-М2 при расчете погрешности измерения $\langle Z_{eff} \rangle$ можно пренебречь вкладом излучения, отраженного от стенки.

Измерения $\langle Z_{eff} \rangle$ проводились в широком диапазоне плотностей электронов $n_e \approx (0.5–8.0) \cdot 10^{19} \text{ m}^{-3}$. В результате получена зависимость $\langle Z_{eff} \rangle$ от электронной плотности n_e , которая представлена на рис. 1, *c*. Для разрядов с пучком значение $\langle Z_{eff} \rangle$ взято на 18 ms от начала инжекции, для омических разрядов — в момент времени с максимальной плотностью n_e в стационарной стадии разряда. Результаты измерения демонстрируют уменьшение величины $\langle Z_{eff} \rangle$ с увеличением электронной плотности n_e , что соответствует уменьшению доли содержания примеси при напуске рабочего газа. Такая

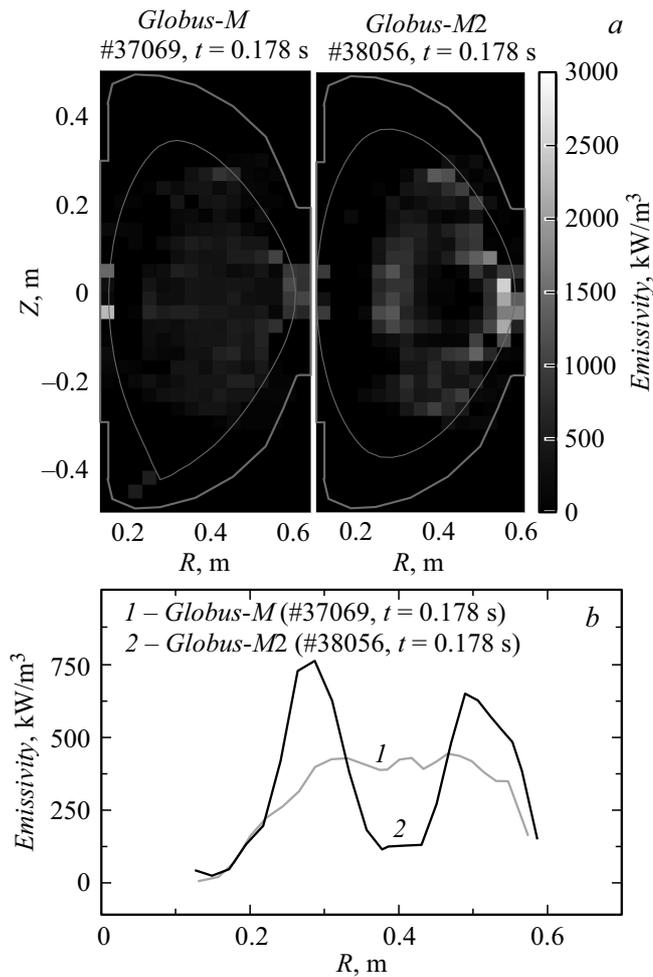


Рис. 2. *a* — двумерное распределение P_{rad} в полоидальном сечении с магнитной конфигурацией SOL в разрядах на токамаках Глобус-М при плотности $\langle n_e \rangle = 3.62 \cdot 10^{13} \text{ m}^{-3}$ (#37069) и Глобус-М2 при плотности $\langle n_e \rangle = 3.15 \cdot 10^{19} \text{ m}^{-3}$ (#38056); *b* — профили радиационных потерь $P_{rad}(R)$ в разрядах на токамаках Глобус-М при плотности $\langle n_e \rangle = 3.62 \cdot 10^{13} \text{ m}^{-3}$ (#37069) (1) и Глобус-М2 при плотности $\langle n_e \rangle = 3.15 \cdot 10^{19} \text{ m}^{-3}$ (#38056) (2).

картина наблюдается на большинстве установок (см., например, зависимость эффективного заряда от электронной плотности, рассмотренную в работах [8,9]).

Радиационные потери на токамаке Глобус-М2 измеряются с помощью системы на основе фотодиодов SPD (silicon precision detector) [10], состоящей из матрицы 16×16 и линейки 1×24 , а также дискретных фотодиодов, регистрирующих излучение из различных пространственных областей. Методами томографии восстанавливается двумерное распределение P_{rad} в полоидальном сечении [11]. Геометрия диагностики была изменена по сравнению с токамаком Глобус-М: линейка была перенесена таким образом, что объемы наблюдения линейки и матрицы пересекались (рис. 1, *a*). Основной вклад в радиационные потери на токамаке Глобус-М2 вносится линейчатым излучением низкозарядных примесей, по-

ступающих со стенки камеры, покрытой графитовыми плитками [11]. Также в экспериментах периодически используется осаждение на поверхность бороуглеродной пленки (боронизация) в тлеющем разряде в смеси гелия и паров карборана [12].

В ходе экспериментальной кампании 2019 г. на токамаке Глобус-М2 были впервые проведены измерения радиационных потерь в разрядах с тороидальным магнитным полем до 0.7 Т и током по плазме до 300 кА. Результаты восстановления двумерного распределения P_{rad} в разряде #38056 с параметрами $B_T = 0.7 \text{ Т}$, $I_p = 300 \text{ кА}$ представлены на рис. 2, *a*, причем мощность полных радиационных потерь из всего объема плазмы $P_{rad\,tot} = 210 \text{ кВт}$, что составило 28% от мощности нагрева с использованием нейтрального пучка (параметры пучка $P_{NBI} = 850 \text{ кВт}$, $E_{NBI} = 28 \text{ кеВ}$). Мощность нагрева плазмы складывается из двух компонентов: омического нагрева (522 кВт) и поглощенная плазмой мощность из нейтрального пучка (270 кВт). Поглощенная мощность рассчитывается на установке с помощью моделирования взаимодействия пучка с плазмой кодом NUBEAM. Для сравнения здесь также представлен результат измерения P_{rad} на токамаке Глобус-М для разряда #37069 с тороидальным магнитным полем $B_T = 0.4 \text{ Т}$ и током по плазме $I_p = 180 \text{ кА}$ (результаты показаны на рис. 2, *a*, параметры — на рис. 2, *b*), мощность полных радиационных потерь $P_{rad\,tot} = 170 \text{ кВт}$, что составило 43% от мощности нагрева с использованием нейтрального пучка (параметры пучка $P_{NBI} = 650 \text{ кВт}$, $E_{NBI} = 26 \text{ кеВ}$). Мощность омического нагрева составляла 220 кВт, мощность нагрева нейтральным пучком — 180 кВт. В обоих разрядах присутствует дополнительный нагрев нейтральным пучком, а также разряды имеют приблизительно равные электронную температуру T_e и плотность n_e , однако магнитная конфигурация различается. Двумерное распределение и профили радиационных потерь на рис. 2, *a* приведены для момента времени 18 ms от начала инжекции для обоих разрядов.

В разрядах с лимитерной магнитной конфигурацией, в которых проводились измерения, профиль мощности потерь имеет сильный провал в центральной области плазмы. Это может свидетельствовать о том, что на установке Глобус-М2 происходит уменьшение пикированности профиля радиационных потерь: излучение локализовано на периферии плазменного шнура, что является признаком снижения накопления примесей в центральной области плазмы.

Измерения в широком диапазоне электронной плотности плазмы позволили оценить зависимость полных радиационных потерь от плотности электронов. Как видно из рис. 3, мощность полных радиационных потерь растет с увеличением плотности электронов. Для разрядов с пучком значение $P_{rad\,tot}$ взято на 18 ms от начала инжекции, для омических разрядов — в момент времени с максимальной плотностью n_e в стационарной стадии разряда. Несмотря на увеличение абсолютной мощности полных радиационных потерь, они составили менее 45%

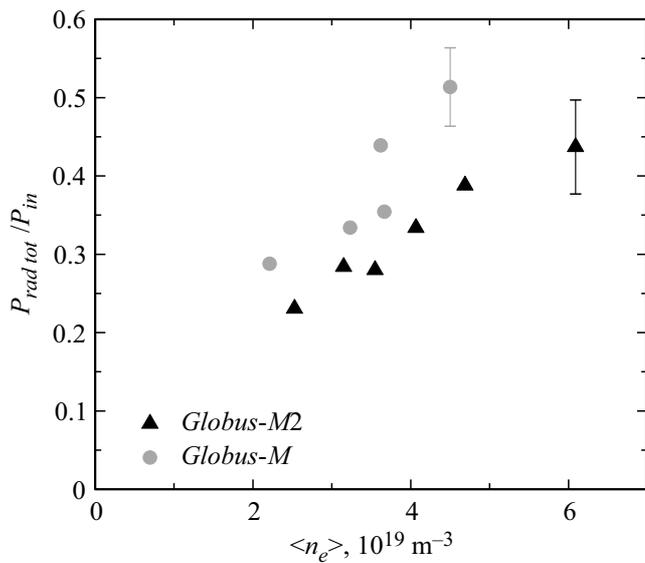


Рис. 3. Зависимость доли радиационных потерь от вкладываемой мощности нагрева $P_{rad\ tot}/P_{in}$ от электронной плотности $\langle n_e \rangle$ на токамаке Глобус-М2.

от вкладываемой мощности. Погрешность P_{rad} здесь представлена определяемой параметром регуляризации при использовании метода регуляризации Тихонова суммой ошибки восстановления и ошибки из-за шумов. Для разрядов, рассмотренных в работе, погрешность составляла в среднем 10%.

Для сравнения на токамаке ASDEX-Upgrade, камера которого покрыта графитом и вольфрамом, при параметрах плазмы $I_p = 1 \text{ MA}$, $n_e = 7 \cdot 10^{19} \text{ m}^{-3}$, $P_{NBI} = 15 \text{ MW}$ мощность радиационных потерь из всего объема плазмы составила 60–80% от вкладываемой мощности [13].

Таким образом, на токамаке Глобус-М2 в условиях увеличенных значений тороидального магнитного поля B_T до 0.7 Т и тока по плазме I_p до 300 кА были измерены $\langle Z_{eff} \rangle$ в разрядах с различными параметрами плазмы, его временная эволюция в течение разряда. Результаты измерения в сериях разрядов позволили получить зависимость $\langle Z_{eff}(n_e) \rangle$, которая продемонстрировала уменьшение $\langle Z_{eff} \rangle$ с увеличением электронной плотности. Кроме того, в новых условиях модернизированной установки измерены полная мощность радиационных потерь и двумерное распределение мощности радиационных потерь в разрядах при различных n_e . Экспериментальные результаты, полученные на модернизированной установке Глобус-М2, свидетельствуют об уменьшении доли мощности радиационных потерь от вкладываемой мощности нагрева, а также о возможном уменьшении накопления примесей в центре плазменного шнура (по сравнению с токамаком Глобус-М).

Финансирование работы

Исследование радиационных потерь выполнено авторами (Е.А. Тюхменева, Г.С. Курский, В.Б. Минаев,

Н.В. Сахаров, Е.О. Киселев, А.Ю. Тельнова, Н.Н. Бахарев, П.Б. Щеголев) при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 17-72-20076).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] V.B. Minaev, V.K. Gusev, N.V. Sakharov, Yu.V. Petrov, V.I. Varfolomeev, N.N. Bakharev, V.A. Belyakov, P.N. Brunkov, V.V. Bulanin, F.V. Chernyshev, V.I. Davydenko, V.V. Dyachenko, A.A. Kavin, S.A. Khitrov, N.A. Khromov, E.O. Kiselev, A.N. Konovalov, V.A. Kornev, G.S. Kurskiev, A.D. Melnik, A.B. Mineev, M.I. Mironov, I.V. Miroshnikov, A.N. Novokhatskii, K.Yu. Oshuev, M.I. Patrov, A.V. Petrov, V.A. Rozhansky, A.N. Saveliev, I.Yu. Senichenkov, P.B. Shchegolev, I.V. Shikhovtsev, A.D. Sladkomedova, V.V. Solokha, D.S. Sorokina, A.Yu. Telnova, V.A. Tokarev, S.Yu. Tolstyakov, A.Yu. Yashin, E.G. Zhilin, J. Phys.: Conf. Ser., **1094**, 012001 (2018). DOI: 10.1088/1742-6596/1094/1/012001
- [2] V.B. Minaev, V.K. Gusev, N.V. Sakharov, V.I. Varfolomeev, N.N. Bakharev, V.A. Belyakov, E.N. Bondarchuk, P.N. Brunkov, F.V. Chernyshev, V.I. Davydenko, V.V. Dyachenko, A.A. Kavin, S.A. Khitrov, N.A. Khromov, E.O. Kiselev, A.N. Konovalov, V.A. Kornev, G.S. Kurskiev, A.N. Labusov, A.D. Melnik, A.B. Mineev, M.I. Mironov, I.V. Miroshnikov, M.I. Patrov, Yu.V. Petrov, V.A. Rozhansky, A.N. Saveliev, I.Yu. Senichenkov, P.B. Shchegolev, O.N. Shcherbinin, I.V. Shikhovtsev, A.D. Sladkomedova, V.V. Solokha, V.N. Tanchuk, A.Yu. Telnova, V.A. Tokarev, S.Yu. Tolstyakov, E.G. Zhilin, Nucl. Fusion, **57**, 066047 (2017). <https://doi.org/10.1088/1741-4326/aa69e0>
- [3] V.K. Gusev, N.N. Bakharev, V.A. Belyakov, B.Ya. Ber, E.N. Bondarchuk, V.V. Bulanin, A.S. Bykov, F.V. Chernyshev, E.V. Demina, V.V. Dyachenko, P.R. Goncharov, A.E. Gorodetsky, E.Z. Gusakov, A.D. Ibyaminova, A.A. Ivanov, M.A. Irzak, E.G. Kaveeva, S.A. Khitrov, M.V. Khokhlov, N.A. Khromov, V.V. Kolmogorov, V.A. Kornev, S.V. Krasnov, G.S. Kurskiev, A.N. Labusov, S.A. Lepikhov, N.V. Litunovskiy, I.V. Mazul, A.D. Melnik, V.V. Mikov, V.B. Minaev, A.B. Mineev, M.I. Mironov, I.V. Miroshnikov, E.E. Mukhin, A.N. Novokhatsky, A.D. Ovsyannikov, M.I. Patrov, A.V. Petrov, Yu.V. Petrov, V.A. Rozhansky, N.V. Sakharov, A.N. Saveliev, I.Yu. Senichenkov, V.Yu. Sergeev, P.B. Shchegolev, O.N. Shcherbinin, I.V. Shikhovtsev, V.S. Tanaev, V.N. Tanchuk, S.Yu. Tolstyakov, V.I. Varfolomeev, E.O. Vekshina, A.V. Voronin, S.P. Voskoboinikov, F. Wagner, A.Yu. Yashin, G.V. Zadvitskiy, A.P. Zakharov, R.Kh. Zalavutdinov, E.G. Zhilin, Nucl. Fusion., **55**, 104016 (2015). DOI: 10.1088/0029-5515/55/10/104016

- [4] Н.Н. Бахарев, И.М. Балаченков, В.И. Варфоломеев, А.В. Воронин, В.К. Гусев, В.В. Дьяченко, М.В. Ильясова, Е.О. Киселев, А.Н. Коновалов, Г.С. Курский, А.Д. Мельник, В.Б. Минаев, И.В. Мирошников, А.Н. Новохацкий, М.И. Патров, Ю.В. Петров, Н.В. Сахаров, О.М. Скрекель, А.Ю. Тельнова, В.А. Токарев, С.Ю. Толстяков, Е.А. Тюхменева, Е.М. Хилькевич, Н.А. Хромов, Ф.В. Чернышев, И.Н. Чугунов, А.Е. Шевелев, П.Б. Щеголев, *Физика плазмы*, **46** (7), 579 (2020). DOI: 10.31857/S036729212007001X
- [5] J.V. Hofmann, *Visible spectroscopy on ASDEX* (Garching, Germany, 1991). Report IPP III/174.
- [6] Е.А. Тухменева, S.Yu. Tolstyakov, G.S. Kurskiev, V.K. Gusev, V.B. Minaev, Yu.V. Petrov, N.V. Sakharov, A.Yu. Telnova, N.N. Bakharev, P.B. Shchegolev, E.O. Kiselev, *Plasma Sci. Technol.*, **21**, 105104 (2019). <https://doi.org/10.1088/2058-6272/ab305f>
- [7] Г.С. Курский, С.Ю. Толстяков, А.А. Березуцкий, В.К. Гусев, М.М. Кочергин, В.Б. Минаев, Е.Е. Мухин, М.И. Патров, Ю.В. Петров, Н.В. Сахаров, В.В. Семёнов, П.В. Чернаков, *ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез*, № 2, 81 (2012). <https://doi.org/10.21517/0202-3822-2012-35-2-81-88>
- [8] Y. Chen, Z. Wu, W. Gao, L. Zhang, W. Zha, *Fusion Eng. Design*, **88**, 2825 (2013). <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2013.05.003>
- [9] S. Sarwar, H.K. Na, J.M. Park, *Rev. Sci. Instrum.*, **89**, 043504 (2018). <https://doi.org/10.1063/1.5004217>
- [10] А.Р. Артыомов, Е.Н. Бакшт, V.F. Tarasenko, A.V. Fedunin, S.A. Chaikovskiy, P.N. Aruev, V.V. Zabrodskii, M.V. Petrenko, N.A. Sobolev, V.L. Suhanov, *Instrum. Exp. Tech.*, **58**, 102 (2015). <https://doi.org/10.1134/S0020441215010017>
- [11] А.Д. Сладкомедова, А.Г. Алексеев, N.N. Bakharev, V.K. Gusev, N.A. Khromov, G.S. Kurskiev, V.B. Minaev, M.I. Patrov, Yu.V. Petrov, N.V. Sakharov, P.B. Shchegolev, V.V. Solokha, A.Yu. Telnova, S.Yu. Tolstyakov, V.V. Zabrodsky, *Rev. Sci. Instrum.*, **89**, 083509 (2018). <https://doi.org/10.1063/1.5039801>
- [12] V.K. Gusev, T.A. Burtsev, A.V. Dech, G.A. Gavrilov, V.E. Golant, S.V. Krikunov, R.G. Levin, V.B. Minaev, A.B. Mineev, O.A. Minyaev, E.E. Mukhin, A.N. Novokhatskii, Yu.V. Petrov, E.N. Romyantsev, N.V. Sakharov, V.M. Sharapov, *Nucl. Fusion*, **41**, 919 (2001). <https://doi.org/10.1088/0029-5515/41/7/313>
- [13] J.C. Fuchs, D. Coster, A. Herrmann, A. Kallenbach, K.F. Mast, ASDEX Upgrade Team, *J. Nucl. Mater.*, **290-293**, 525 (2001). [https://doi.org/10.1016/S0022-3115\(00\)00645-0](https://doi.org/10.1016/S0022-3115(00)00645-0)