

04

Формирование области высокой плотности со стороны сильного магнитного поля вблизи внутреннего дивертора токамака Глобус-М2

© Н.В. Ермаков¹, К.А. Кукушкин², Н.С. Жильцов¹, Е.Е. Ткаченко¹, Г.С. Курскиев¹, Е.Е. Мухин¹, С.Ю. Толстяков¹, П.Б. Щеголев¹, А.Ю. Тельнова¹, В.Б. Минаев¹, В.А. Токарев¹, В.А. Соловей¹, Н.А. Хромов¹, Е.Г. Кавеева², А.А. Кавин³, Е.О. Киселев¹, А.Н. Коваль¹, К.О. Николаенко¹, А.Н. Новохацкий¹, Ю.В. Петров¹, В.А. Рожанский², Н.В. Сахаров¹, И.Ю. Сениченков²

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

² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

³ АО „НИИЭФА им. Д.В. Ефремова“, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: ermafin@gmail.com

Поступило в Редакцию 9 октября 2024 г.

В окончательной редакции 1 ноября 2024 г.

Принято к публикации 15 ноября 2024 г.

Представлены результаты исследования диверторной плазмы токамака Глобус-М2 (большой радиус $R = 0.36$ м, малый $a = 0.24$ м) с открытым дивертором с использованием диагностик томсоновского рассеяния в области X-точки и в экваториальной плоскости, а также зондов Ленгмюра в наружном диверторе. Измерения температуры диверторных пластин и фиксация положения пересечения сепаратрисы с ними проводились при помощи ИК-камеры. Явление, известное как формирование области высокой плотности во внутреннем диверторе (high field side high density, HFSHD), было впервые зафиксировано на сферическом токамаке и нашло подтверждение в моделировании разрядов токамака Глобус-М2 кодом SOLPS-ITER. HFSHD формируется между внутренней (X-точка снизу) и внешней (X-точка сверху) сепаратрисами.

Ключевые слова: токамак, плазма, томсоновское рассеяние, дивертор, Глобус-М2, SOLPS-ITER, HFSHD.

DOI: 10.61011/PJTF.2025.06.59927.20143

В термоядерном реакторе значительная часть тепловой энергии, вырабатываемой в реакции термоядерного синтеза, должна быть выведена через узкий обдирочный слой снаружи от сепаратрисы на диверторные пластины. В токамаках следующего поколения, таких как ITER, DEMO, STEP, одной из основных задач является контроль плотности потока энергии на диверторные пластины [1]. Особенно остро проблема снижения нагрузки на диверторные пластины стоит в сферических токамаках с малым аспектным отношением ($R/a \sim 1.5$), где во внутреннем диверторе ситуация осложняется из-за малой величины радиуса (а следовательно, и малой площади взаимодействия с плазмой) линии пересечения сепаратрисы с диверторными пластинами (inner strike point, ISP). Исследования отрыва диверторной плазмы, которые проводились в L-моду на токамаке ASDEX Upgrade (AUG) с полностью вольфрамовой стенкой, показали, что начало частичного отрыва плазмы во внутреннем диверторе характеризуется формированием области высокой электронной плотности [2]. Существование этого фронта высокой плотности со стороны сильного поля было также продемонстрировано как в полностью углеродном AUG [3], так и в JET, оснащенном металлической стенкой (Be/W) [4]. В [5] с помощью диагностики диверторного томсоновского рассеяния было исследовано наличие такого режима как в L-моду, так и в H-моду. В установках с металлическими стенками и, следовательно, без распыления примеси, излучающей в диверторе, добавление таких примесей,

как N или Ar, схоже с воздействием примеси-излучателя C в углеродных машинах [6,7].

Формирование области высокой электронной плотности (n_e) во внутреннем диверторе (область внутренней ноги сепаратрисы открытого дивертора) токамака с углеродной стенкой Глобус-М2 продемонстрировано с помощью диагностики диверторного томсоновского рассеяния (ДТР) [8] в широком диапазоне параметров при центральной n_e , изменявшейся в диапазоне от $2 \cdot 10^{19}$ до $1.4 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$, как в режимах с омическим нагревом, так и с дополнительным нагревом пучком нейтрального дейтерия (0.4 MW). Хорда зондирования ДТР направлена вертикально вверх ($R = 24$ см) вблизи X-точки со стороны сильного магнитного поля, вдоль вертикально расположенной части незамкнутой магнитной поверхности, соответствовавшей потоковой координате, варьировавшейся в диапазоне $\rho_\psi \in [0.95, 1.05]$. При моделировании данные хордовых измерений ДТР рассматриваются совместно с данными зондовых измерений в области выхода сепаратрисы на диверторные пластины внешнего дивертора (outer strike point, OSP), ИК-видеокамеры, которая позволяла контролировать положение ISP и OSP, а также совместно с данными томсоновского рассеяния (ТР) на сепаратрисе в экваториальной плоскости, включая n_e и T_e , измеренные на внешнем обводе (рис. 1). Магнитная реконструкция осуществлялась с использованием кодов метода подвижных токовых колец [9] и ruGSS [10]. Длительность разряда токамака Глобус-М2 составляла 190–220 ms.

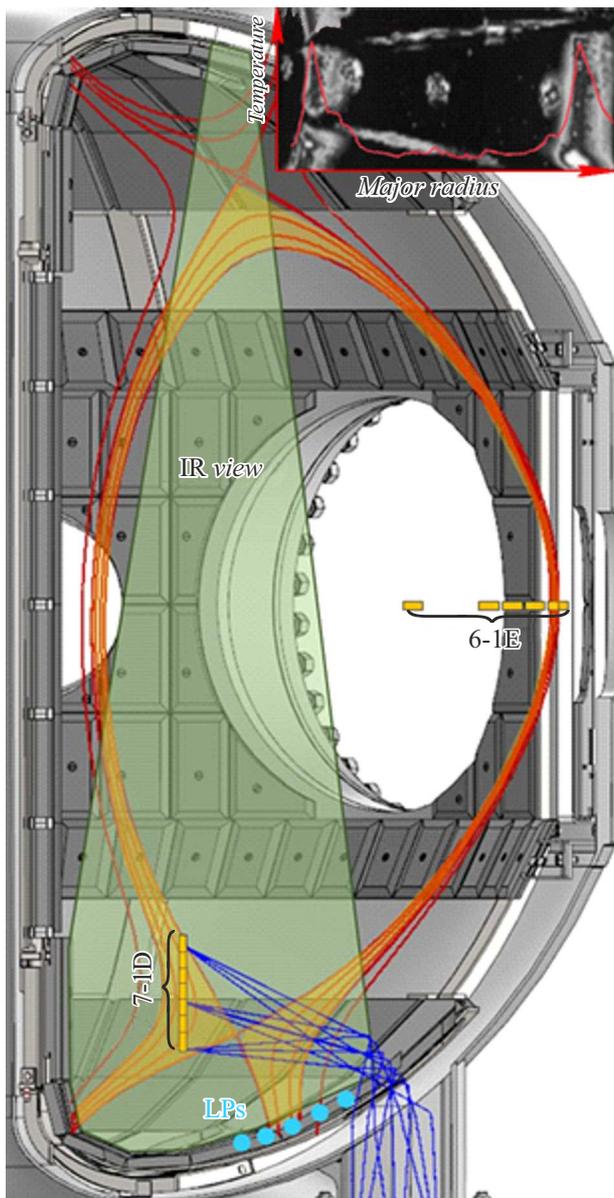


Рис. 1. Схема эксперимента. Положения зондов Ленгмюра (LPs) и лазерных хорд диагностик ТР (7-1D, 6-1E), поле зрения ИК-видеокамеры (IR view). Вверху справа — снимок ИК-видеокамеры диверторных пластин. Приведена магнитная конфигурация разряда 44644 в стационарной фазе разряда, желтым закрашена область между внешней и внутренней сепаратрисами. Цветной вариант рисунков представлен в электронной версии статьи.

Стационарная фаза разряда начиналась со 150–160 ms, что при частоте зондирования плазмы 100 Hz позволяло получить пять-семь измерений ДТР за разряд. Лазеры экваториальной Nd:YAG 1064 nm/3 J/300 Hz/10 ns и диверторной Nd:YAG 1064 nm/2 J/100 Hz/3 ns диагностик ТР были синхронизованы с точностью до 0.2 ms. Таким образом, каждый третий выстрел лазера экваториальной диагностики ТР происходил практически одновременно

с выстрелом лазера диверторной диагностики. Взаимное расположение точек измерений и характерная магнитная конфигурация разряда токамака Глобус-М2 изображены на рис. 1. Во всех исследованных разрядах токамака Глобус-М2 при магнитном поле 0.7 T (как омических, так и с дополнительным нагревом нейтральным пучком дейтерия) ток по плазме составлял ~ 300 kA и был характерен следующий сценарий: на 160 ms разряда окончательно формировалась диверторная конфигурация, о чем можно судить как по измерениям магнитных зондов и реконструкции магнитной конфигурации методом токовых колец, так и по данным ИК-камеры, после чего плотность электронов на внутреннем обводе начинала заметно расти при неизменной плотности на сепаратрисе в экваториальной плоскости. Результаты измерений n_e в 18 разрядах на плато тока — как омических, так и с дополнительным нагревом — показаны на рис. 2. Выявленное превышение максимального значения n_e во внутреннем диверторе по отношению к n_e , измеренной на той же магнитной поверхности в экваторе на внешнем обводе, мы связываем с формированием области HFSHD (high field side high density) [2].

Обнаруженное формирование области высокой n_e во внутреннем диверторе нашло подтверждение при моделировании с помощью кода SOLPS-ITER [11] с полным учетом дрейфов и токов. Моделирование было выполнено для разряда 44644. Моделирование нейтральных частиц, включая атомы и молекулы дейтерия, а также атомы углерода, проводилось методом Монте-Карло с использованием кода EIRENE, что существенно повысило точность по сравнению с гидродинамическим подходом [12–14], так как позволило гораздо точнее рассчитать источник ионизации как внутри, так и снаружи сепаратрисы и корректно описать области с большими длинами свободного пробега нейтральных частиц и геометрию стенки камеры токамака Глобус-М2,

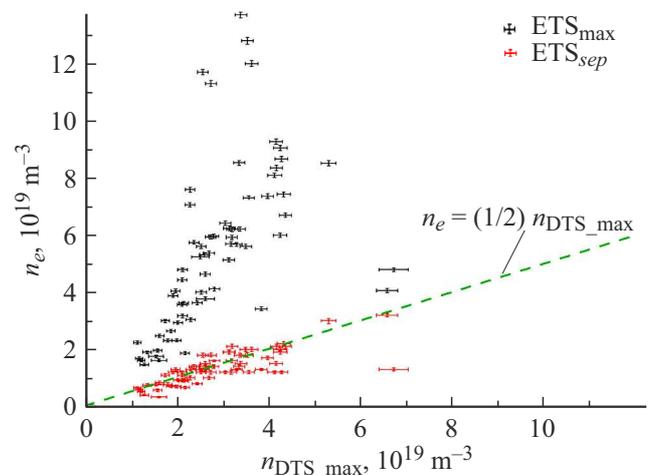


Рис. 2. Зависимость концентрации, измеренной в центре плазмы (ETS_{max}) и на сепаратрисе (ETS_{sep}) диагностикой ТР в экваторе, от максимальной измеренной концентрации в диверторе (n_{DTS_max}).

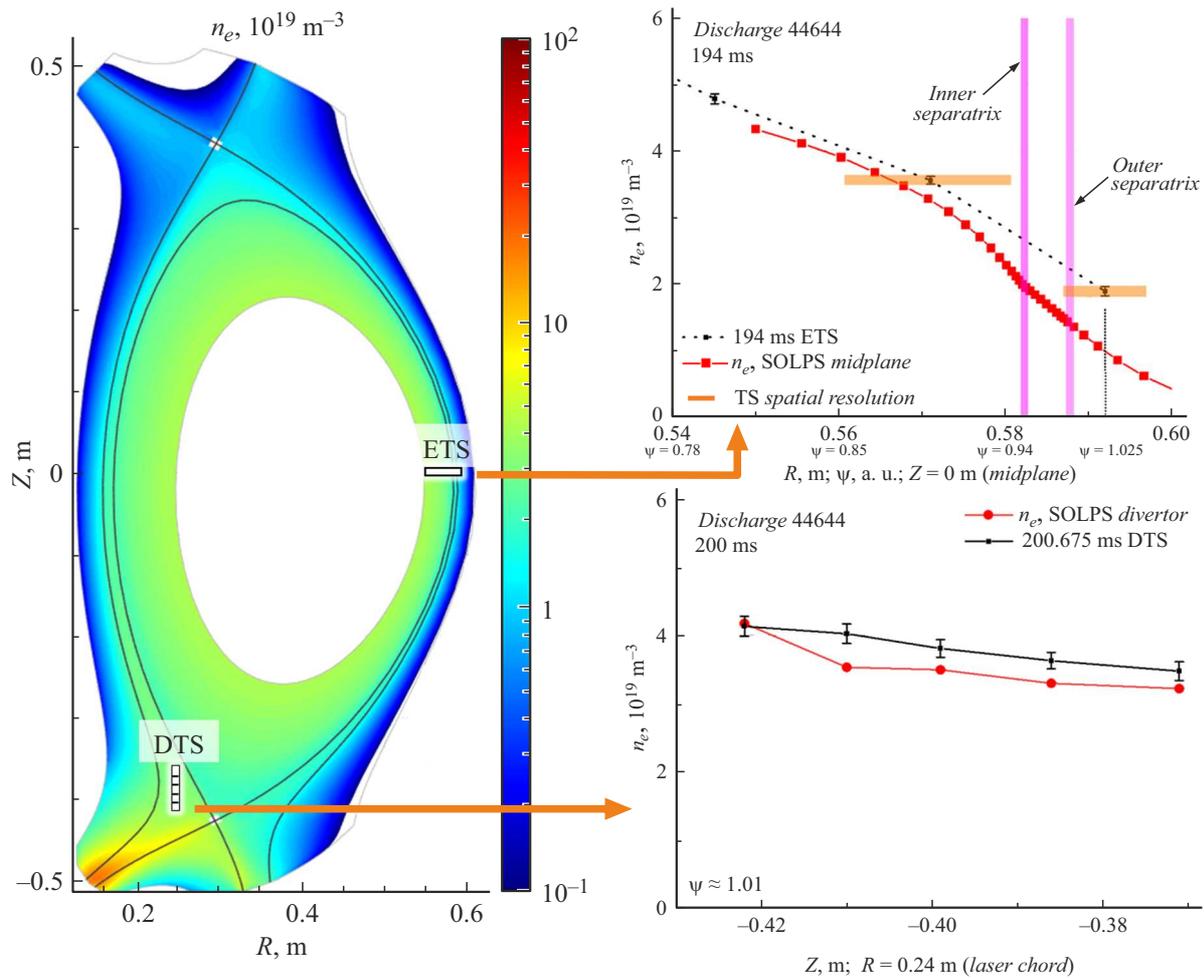


Рис. 3. Распределение электронной концентрации в диверторе токамака Глобус-М2, рассчитанное для разряда 44644, и сравнение расчетных значений электронной плотности с плотностями, измеренными диагностиками томсоновского рассеяния в диверторе (DTS) и экваториальной плоскости (ETS).

включая положение напуска дейтерия. При моделировании скорость напуска газа равной $3 \cdot 10^{20}$ atoms/s, а поток дейтерия из центра плазменного шнура, вызванный нейтральной инжекцией, — $1.1 \cdot 10^{20}$ atoms/s, что значительно меньше источника ионизации в области моделирования внутри сепаратрисы. При моделировании предполагалось, что на стенке и пластинах дивертора происходит частичное поглощение дейтерия при коэффициенте отражения падающих на поверхности частиц, равном 99.3%. Физическое распыление углерода рассчитывалось по формуле Рота–Богданского [15]. Химическое распыление принималось равным $\sim 8\%$ по отношению к потокам атомов и ионов дейтерия. Расчет делался в приближении, что отражение падающих ионов и атомов углерода отсутствует. Поток углерода в центр плазменного шнура, просуммированный по всем зарядовым состояниям, полагался равным нулю. Значение эффективного заряда составило 1.3 на внутренней границе расчетной области и 1.9 на сепаратрисе на внешнем обводе, а средняя расчетная плотность углерода на

сепаратрисе — $9.5 \cdot 10^{17} \text{ m}^{-3}$. Градиентный дрейф ионов направлен к активной X-точке. В отличие от разрядов, использованных при моделировании [12–14], в данном разряде расстояние между сепаратрисой на внутреннем обводе и центральной колонной, а также расстояние между сепаратрисой на внешнем обводе и стенкой камеры было увеличено. Такая конфигурация позволила увеличить расчетную область за счет уменьшения основного объема плазмы. Общая ширина расчетной области снаружи от основной сепаратрисы на внешнем обводе ~ 27 mm. Тепловые потоки из центральной области заданы с учетом экспериментальных значений мощности омического нагрева $P_{oh} = 288$ kW и нагрева нейтральной инжекцией $P_{NBI} = 410$ kW. Расстояние между основной и внешней сепаратрисами на наружном обводе ~ 5 mm соответствует длине падения электронного теплового потока, в то время как ширина SOL (scrape-off layer) в данном разряде обеспечивает практически полную экранировку стенки от потока энергии из центральной плазмы. Смоделированное двумерное

распределение электронной плотности представлено на рис. 3. В целом моделирование подтверждает вывод работы [14] о формировании в токамаке Глобус-М2 области повышенной концентрации в диверторе со стороны сильного магнитного поля. Эта область располагается между внутренней и внешней сепаратрисами, где холодная внутренняя пластина связана магнитными трубками с горячей внешней пластиной. Эта связь приводит к возникновению термоэлектрического тока. Большое полоидальное электрическое поле, необходимое для прохождения этого тока через слой холодной плазмы, приводит к радиальному дрейфу в направлении сильного магнитного поля, что ведет к образованию области повышенной концентрации. Снаружи внешней (не основной) сепаратрисы внутренняя нижняя пластина связана с холодной внутренней верхней пластиной, и термоэлектрический ток мал.

Обнаруженное явление, известное как формирование области высокой плотности во внутреннем диверторе, впервые зафиксировано на сферическом токамаке в широком диапазоне параметров разряда в режимах как с омическим нагревом, так и с дополнительным нагревом пучком нейтрального дейтерия (0.4 MW). Измерения диагностики томсоновского рассеяния показали формирование во внутреннем диверторе области плазмы с повышенной плотностью, которая превышает плотность на той же магнитной поверхности в экваториальной плоскости на внешнем обводе. Проведенное исследование показало хорошее согласие эксперимента и результатов моделирования (на примере разряда 44644) кодом SOLPS-ITER с описанием атомов и молекул дейтерия и атомов углерода по методу Монте-Карло EIRENE. Обнаруженное явление позволяет глубже понять механизмы устойчивости и поведения плазмы в сферическом токамаке. Дальнейшие работы по исследованию дивертора токамака Глобус-М2 будут связаны с применением комплекса диагностик токамака Глобус-М2 и кода SOLPS-ITER с описанием нейтральных частиц методом Монте-Карло. Их целью являются исследования области X-точки и режимов работы дивертора с отрывом плазмы от диверторных пластин.

Благодарности

Вычисления произведены в Суперкомпьютерном центре „Политехнический“ СПбПУ.

Финансирование работы

Работы по исследованию диверторной плазмы поддержаны РФФИ (23-79-00033).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] R.A. Pitts, S. Carpentier, F. Escourbiac, T. Hirai, V. Komarov, A.S. Kukushkin, S. Lisgo, A. Loarte, M. Merola, R. Mitteau, A.R. Raffray, M. Shimada, P.C. Stangeby, *J. Nucl. Mater.*, **438**, 48 (2013).
[http://refhub.elsevier.com/S0022-3115\(14\)00949-0/h0005](http://refhub.elsevier.com/S0022-3115(14)00949-0/h0005)
- [2] S. Potzel, M. Wischmeier, M. Bernert, R. Dux, H.W. Müller, A. Scarabosio, *Nucl. Fusion*, **54**, 013001 (2014).
DOI: 10.1088/0029-5515/54/1/013001
- [3] K. McCormick, R. Dux, R. Fischer, A. Scarabosio, *J. Nucl. Mater.*, **390-391**, S465 (2009).
DOI: 10.1016/j.jnucmat.2009.01.145
- [4] S. Potzel, M. Wischmeier, M. Bernert, R. Dux, F. Reimold, A. Scarabosio, S. Brezinsek, M. Clever, A. Huber, A. Meigs, M. Stamp, *J. Nucl. Mater.*, **463**, 541 (2015).
DOI: 10.1016/j.jnucmat.2014.12.008
- [5] M. Cavedon, B. Kurzan, M. Bernert, D. Brida, R. Dux, M. Griener, S. Henderson, E. Huett, T. Nishizawa, T. Lunt, O. Pan, U. Stroth, M. Wischmeier, E. Wolfrum, *Nucl. Fusion*, **62**, 066027 (2022). DOI: 10.1088/1741-4326/ac6071
- [6] R. Neu, A. Kallenbach, M. Balden, V. Bobkov, J.W. Coenen, R. Drube, R. Dux, H. Greuner, A. Herrmann, J. Hobirk, H. Höhnle, K. Krieger, M. Kočan, P. Lang, T. Lunt, H. Maier, M. Mayer, H.W. Müller, S. Potzel, T. Pütterich, J. Rapp, V. Rohde, F. Ryter, P.A. Schneider, J. Schweinzer, M. Sertoli, J. Stober, W. Suttrop, K. Sugiyama, G. van Rooij, M. Wischmeier, *J. Nucl. Mater.*, **438**, S34 (2013).
[http://refhub.elsevier.com/S0022-3115\(14\)00949-0/h0035](http://refhub.elsevier.com/S0022-3115(14)00949-0/h0035)
- [7] S. Brezinsek, S. Jachmich, M.F. Stamp, A.G. Meigs, J.W. Coenen, K. Krieger, C. Giroud, M. Groth, V. Philipps, S. Grünhagen, R. Smith, G.J. van Rooij, D. Ivanova, G.F. Matthews, *J. Nucl. Mater.*, **438**, S303 (2013).
[http://refhub.elsevier.com/S0022-3115\(14\)00949-0/h0040](http://refhub.elsevier.com/S0022-3115(14)00949-0/h0040)
- [8] N.V. Ermakov, N.S. Zhiltsov, G.S. Kurskiev, E.E. Mukhin, S.Yu. Tolstyakov, E.E. Tkachenko, V.A. Solovey, I.V. Bocharov, K.V. Dolgova, A.A. Kavin, A.N. Koval, K.O. Nikolaenko, A.N. Novokhatsky, Yu.V. Petrov, V.A. Rozhansky, N.V. Sakharov, I.Yu. Senichenkov, *Plasma Phys. Rep.*, **49** (12), 1480 (2023). DOI: 10.1134/S1063780X23601712
- [9] V.I. Vasiliev, Yu.A. Kostsov, K.M. Lobanov, L.P. Makarova, A.B. Mineev, V.K. Gusev, R.G. Levin, Yu.V. Petrov, N.V. Sakharov, *Nucl. Fusion*, **46** (8), S625 (2006).
DOI: 10.1088/0029-5515/46/8/S08
- [10] E.O. Kiselev, I.M. Balachenkov, N.N. Bakharev, V.I. Varfolomeev, V.K. Gusev, N.S. Zhiltsov, O.A. Zenkova, A.A. Kavin, G.S. Kurskiev, V.B. Minaev, I.V. Miroshnikov, M.I. Patrov, Yu.V. Petrov, N.V. Sakharov, O.M. Skrekel, V.V. Solokha, A.Yu. Telnova, E.E. Tkachenko, V.A. Tokarev, E.A. Tukhmenova, N.A. Khromov, P.B. Shchegolev, *Plasma Phys. Rep.*, **49**, 1560 (2023).
DOI: 10.1134/S1063780X23601657
- [11] X. Bonnin, W. Dekeyser, R. Pitts, D. Coster, S. Voskoboinikov, *Plasma Fusion Res.*, **11**, 1403102 (2016).
DOI: 10.1585/pfr.11.1403102
- [12] E. Vekshina, V. Rozhansky, E. Kaveeva, I. Senichenkov, N. Khromov, *Plasma Phys. Control. Fusion*, **61**, 125009 (2019). DOI: 10.1088/1361-6587/ab4d0b

- [13] E. Vekshina, K. Dolgova, V. Rozhansky, E. Kaveeva, I. Senichenkov, P. Molchanov, V. Timokhin, N. Khromov, N. Zhiltsov, N. Bakharev, E. Kiselev, E. Tuhmeneva, *Phys. Plasmas*, **30**, 042504 (2023). DOI: 10.1063/5.0134542
- [14] K. Dolgova, E. Vekshina, V. Rozhansky, *Plasma Phys. Control. Fusion*, **66**, 035001 (2024). DOI: 10.1088/1361-6587/ad1b89
- [15] J. Roth, C. Garcia-Rosales, *Nucl. Fusion*, **36**, 1647 (1996). DOI: 10.1088/0029-5515/36/12/I05