

04

Нагрев ионов плазмы токамака Глобус-М2 при инжекции высокоэнергичных атомов водорода и дейтерия

© Г.С. Курский¹, И.В. Мирошников¹, Н.В. Сахаров¹, В.К. Гусев¹, В.Б. Минаев¹, Ю.В. Петров¹, А.Ю. Тельнова¹, Н.Н. Бахарев¹, Е.О. Киселев¹, Н.С. Жильцов¹, П.Б. Щеголев¹, И.М. Балаченков¹, В.И. Варфоломеев¹, А.В. Воронин¹, В.Ю. Горяинов¹, А.А. Кавин², С.В. Крикунов¹, А.Д. Мельник¹, А.Б. Минеев², А.Н. Новохацкий¹, М.И. Патров¹, А.М. Пономаренко³, О.М. Скрекель¹, В.А. Соловей⁴, В.В. Солоха¹, Е.Е. Ткаченко¹, В.А. Токарев¹, С.Ю. Толстяков¹, Е.А. Тюхменева¹, Н.А. Хромов¹, Ф.В. Чернышев¹, К.Д. Шулятьев¹, А.Ю. Яшин^{1,3}

¹ ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

² АО „НИИЭФА им. Д.В. Ефремова“, Санкт-Петербург, Россия

³ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

⁴ Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова, НИЦ „Курчатовский институт“, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: Gleb.Kurskiy@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 14 ноября 2024 г.

В окончательной редакции 14 ноября 2024 г.

Принято к публикации 18 ноября 2024 г.

Проведено экспериментальное исследование нагрева плазмы сферического токамака Глобус-М2 при высоком тороидальном магнитном поле методом нейтральной инжекции. Инжекция пучка дейтерия в дейтериевую плазму позволяет получить заметно более высокие значения температуры ионов, чем при нагреве дейтериевой плазмы водородным пучком, причем в обоих случаях ионная температура существенно превышает электронную, и плазма находится в так называемом „режиме с горячими ионами“. Время удержания энергии плазмы при нагреве дейтериевым пучком значительно выше, чем при инжекции водорода, вследствие более высокой эффективности термоизоляции ионного компонента плазмы.

Ключевые слова: управляемый термоядерный синтез, сферический токамак, Глобус-М2, нейтральная инжекция, режим с горячими ионами.

DOI: 10.61011/PJTF.2025.07.60064.20186

В экспериментах по нагреву плазмы сферических токамаков (СТ) при тороидальном магнитном поле $B_T < 0.55$ Т было получено, что перенос тепла ионами в режиме Н-моды хорошо описывается с помощью неоклассической теории [1,2]. Однако при достижении низкой столкновительности ожидалось развитие мелкомасштабных неустойчивостей, таких как ионная температурно-градиентная мода (ITG) [3] или гибридная неустойчивость, сочетающая свойства кинетической баллонной моды и моды на запертых электронах (КВМ/ТЕМ) [4], вызывающих сильный аномальный перенос энергии ионами. Первые эксперименты, проведенные на СТ при $B_T = 0.8$ Т, показали, что перенос тепла ионами становится аномальным, что препятствует росту ионной температуры и превышению ею значений электронной температуры [5,6]. Однако последующие эксперименты, проведенные на СТ с высоким магнитным полем, показали возможность нагреть ионы плазмы в компактном токамаке до субтермоядерных температур 4–8 keV [7–9] с помощью нейтральной инжекции.

Ранее было установлено, что на токамаке Глобус-М2 при использовании двух инжекторов для нагрева дейтериевой плазмы температура ионов превышает температуру электронов более чем в 1.5 раза в широком

диапазоне значений средней концентрации электронов плазмы $(1.6–10) \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ [6] с характерно выраженным максимумом вблизи $n_e \approx 5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$. Более детальный анализ показал, что максимально достижимое значение температуры ионов зависит главным образом от массы инжектируемых высокоэнергичных атомов (рис. 1). Сравним два разряда Глобус-М2, соответствующих разной массе инжектируемого иона при одинаковых значениях $B_T = 0.9$ Т и тока плазмы $I_p = 0.35$ МА. В обоих случаях инжекция первого пучка начинается еще на стадии роста тока плазмы и длится практически до окончания разряда. Второй пучок, длительность работы которого ограничена 40 ms, включается, когда ток плазмы выходит на плато (рис. 2). Мощность омического нагрева в разряде с водородной инжекцией оценивается в 0.2 MW, а в разряде с дейтериевой инжекцией — в 0.17 MW. Это значительно меньше вводимой мощности дополнительного нагрева, которая в первом случае составляет 1.35 MW, а во втором — 1.15 MW. Потери инжектированной мощности возникают главным образом из-за потерь быстрых ионов с неустойчивых орбит, а также при их торможении вследствие перезарядки на нейтральных частицах. Поглощенная мощность пучка, рассчитанная кодом NUBEAM, находится в диапазоне

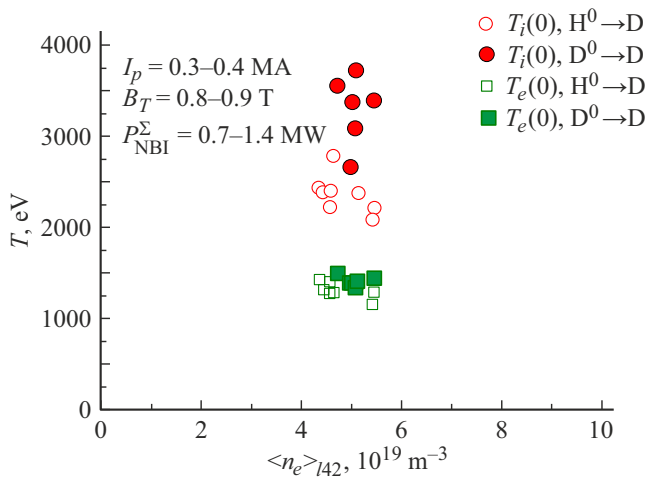


Рис. 1. Усредненные значения температуры электронов и ионов в центральной области плазмы в режиме с нагревом дейтериевой плазмы водородным и дейтериевым пучками. Каждая точка соответствует отдельному разряду, представленные значения также усреднены по нескольким временным точкам. Водородная инжекция — разряды 42122, 42119, 42089, 42121, 42341, 42325, 42341. Дейтериевая инжекция — разряды 42777, 42703, 42368, 42767, 41585, 42416.

0.54–0.81 MW для дейтериевого пучка и 0.85–1.15 MW для водородного (в зависимости от концентрации нейтральных частиц). Температура ионов, измеренная диагностикой спектроскопии рекомбинации перезарядки (CXRS) с временным разрешением 5 ms, растет с момента начала инжекции второго пучка, значительно превышая электронную температуру, измеренную диагностикой томсоновского рассеяния. В обоих разрядах присутствуют пилообразные колебания. После каждого перезамыкания на магнитных зондах наблюдаются быстро затухающие колебания в диапазоне частот ~ 30 kHz, предположительно с модовыми числами $m = 2$, $n = 1$ (2/1). Характер магнитогиродинамических колебаний в разряде с инжекцией дейтерия несколько отличается. В конце разряда (после 0.22 s) длительность и амплитуда колебаний растут, неустойчивость наблюдается вплоть до начала следующего периода пилообразных колебаний, одновременно с этим наблюдается снижение ионной температуры с 4 до 2.5 keV.

Для сравнения пространственных распределений температуры и последующего анализа энергобаланса плазмы выберем время вблизи максимума ионной температуры (рис. 3). Видно, что максимальные измеренные значения температуры ионов достигают величины 4 keV при инжекции дейтериевого пучка, что существенно больше, чем при нагреве водородным пучком, в то время как электронная температура и плотность существенно не отличаются (рис. 2 и 3). Энергия, запасенная электронами и ионами плазмы, полученная по данным кинетических диагностик, приведена в таблице. Из таблицы видно, что значительная часть полной тепловой энергии, запасенной в плазме, обусловлена ионами и меняется

Параметры плазменных разрядов с инжекцией водородного и дейтериевого пучков при средней плотности $5 \cdot 10^{19} \text{ m}^{-3}$

Параметр	Разряд 42119 (H→D)	Разряд 42777 (D→D)
W_e , kJ	4.4	4.6
W_i , kJ	4.1	7.1
W_{th} , kJ	8.5	11.7
P_{abs}^{NBI} , kW	850–1150	540–810
P_e^{NBI} , kW	435–640	390–590
P_i^{NBI} , kW	380–510	150–220
τ_E , ms	8.4–6.3	16.5–12
τ_E^i , ms	15–8.5	80–24
τ_E^e , ms	6–5	7.6–6.8
χ_e , m ² /s	1.2–1	1.3–1
χ_i , m ² /s	2.7–3.7	0.3–0.95
χ_i^{neo} , m ² /s	~ 1	~ 1
P_{ie} , kW	160	300
Z_{eff}	3.5	3
P_{oh} , kW	200	170

Примечание. W_e , W_i , W_{th} — тепловая энергия электронов, ионов и их сумма соответственно, P_{abs}^{NBI} — мощность нагрева плазмы пучком атомов, P_e^{NBI} , P_i^{NBI} — мощность нагрева электронов и ионов пучком атомов соответственно, τ_E , τ_E^e , τ_E^i — времена удержания тепловой энергии плазмы, электронного и ионного компонентов соответственно, χ_e , χ_i , χ_i^{neo} — температуропроводности электронов, ионов и оценка ионной неоклассической температуропроводности для дейтерия, P_{ie} — мощность нагрева электронов при взаимодействии с тепловыми ионами, Z_{eff} — эффективный заряд, определенный на основе измеренных значений интенсивности тормозного излучения и профилей температуры и концентрации электронов, P_{oh} — мощность омического нагрева.

от 48 % при инжекции водорода до 60 % при инжекции дейтерия. Мощность нагрева плазмы была рассчитана кодом NUBEAM [10] для разных значений концентрации нейтральных частиц, которая при моделировании являлась свободным параметром и вносила основную неопределенность в результаты расчета (см. таблицу). При инжекции дейтериевого пучка время удержания энергии приблизительно в 2 раза выше, чем при нагреве плазмы водородным пучком, и находится в диапазоне 12–16.5 ms, превосходя скейлинг IPB98(y,2) в 2 раза.

Рассмотрим энергобаланс в электронном и ионном каналах. Распределение мощности дополнительного нагрева между электронами и ионами зависит от критической энергии, $E_{crit} = 14.8 \frac{A_b}{A_{pl}^{2/3}} T_e$. Здесь A_b — масса инжектируемого атома, A_{pl} — масса иона плазмы. Когда энергия быстрых частиц равна E_{crit} , ионы и электроны плазмы нагреваются с одной скоростью. Если энергия быстрых частиц меньше E_{crit} , доминирует нагрев ионов. Поскольку в рассматриваемых случаях A_{pl} и T_e одинаковы, то E_{crit} зависит только от A_b и, как следствие, отличается вдвое. Поэтому распределение поглощенной мощности нагрева пучка между электронным и ионным компонентом будет также различаться. Расчеты, выполненные кодом NUBEAM, учитывают пространственное распределение T_e , а также шестикомпонентный энерге-

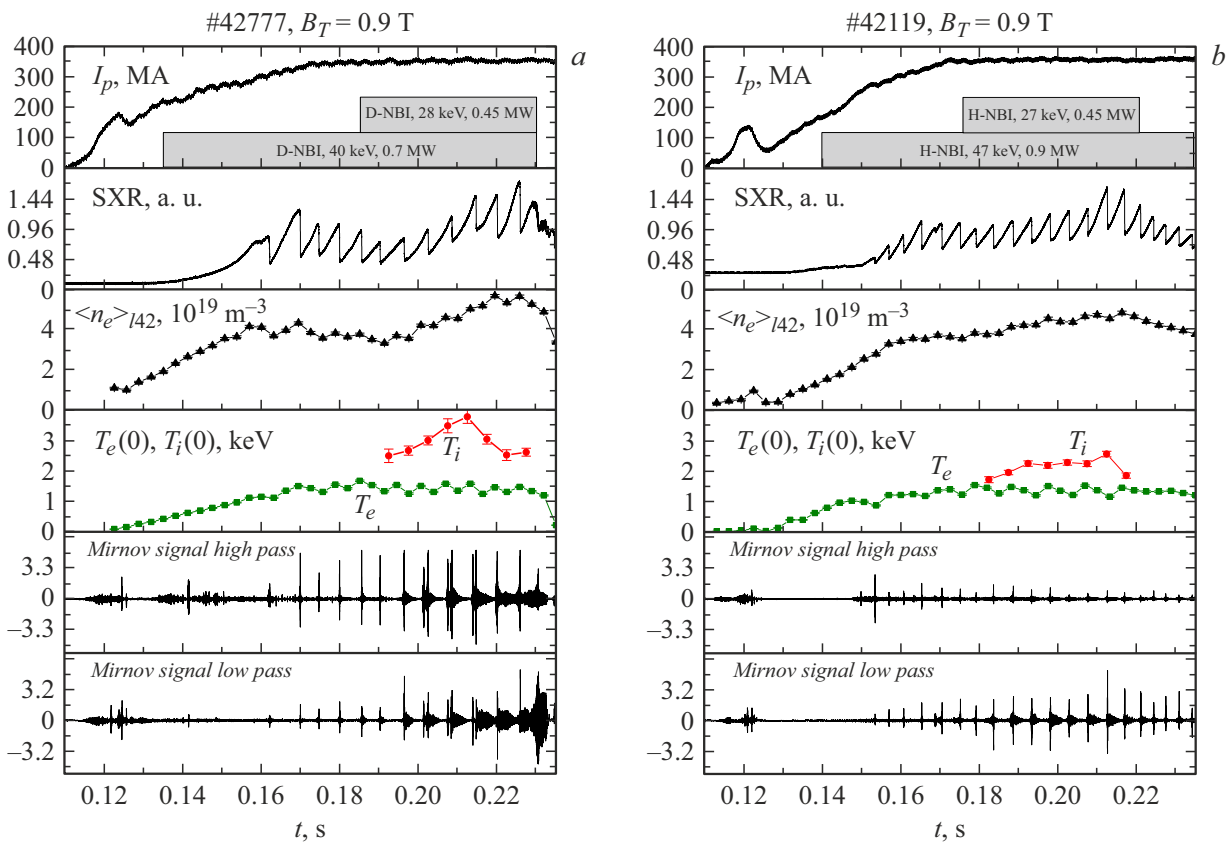


Рис. 2. Динамика основных параметров плазмы в разрядах токамака Глобус-М2 с дейтериевой (a) и водородной (b) инъекцией. Сверху вниз: ток плазмы, интенсивность мягкого рентгеновского излучения, средняя плотность электронов, температура электронов и ионов в центре плазмы, сигналы высокочастотного и низкочастотного магнитных зондов.

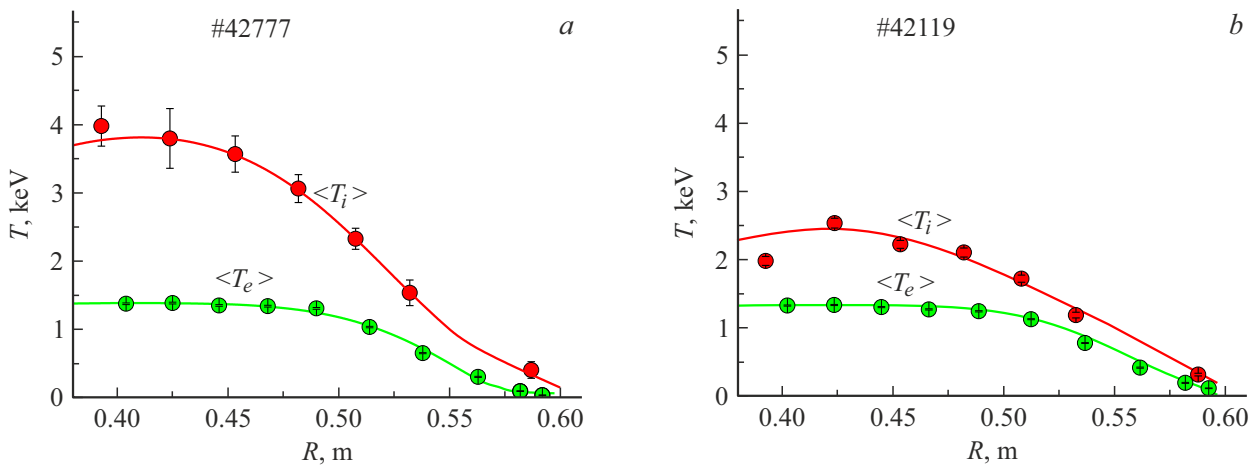


Рис. 3. Пространственные распределения температуры ионов и электронов плазмы токамака Глобус-М2 для режима с дейтериевой (a) и водородной (b) инъекцией, усредненные по 10 ms для разряда 42777 и по 25 ms для разряда 42119.

тический состав инжектируемых пучков и показывают, что мощность нагрева ионов пучком оказывается приблизительно одинаковой (435–640 kW в случае водородной инъекции и 390–590 kW в случае дейтериевой). Происходит это вследствие того, что инжектируемая мощность водородного пучка в выбранных для сравне-

ния разрядах выше, чем дейтериевого. Несмотря на это, температура (и, как следствие, энергозапас) ионов, достигнутая в эксперименте, отличается почти вдвое. Из-за того, что ионная температура превышает электронную, значительная часть энергии ионов передается электронам вследствие кулоновских столкновений. В разряде

с дейтериевой инжекцией (42777) мощность теплообмена между электронами и ионами достигает 300 kW. Результирующая мощность нагрева ионов составляет всего 90–290 kW и соответствует временам удержания энергии ионами 24–80 ms, что в 3–5 раз выше, чем для разряда с инжекцией водорода (42119). Энергия, запасенная электронным компонентом, одинакова в обоих случаях, а время удержания энергии электронами отличается слабо (приблизительно на 30%). Грубую оценку электронной температуропроводности можно сделать следующим образом: $\chi_e = a^2 \kappa (P_e - P_{rad}) / (4W_e)$, где a и κ — малый радиус и вытянутость плазменного шнура соответственно, P_e — суммарная мощность нагрева электронов пучком, тепловыми ионами и омического нагрева. Предполагая, что на долю радиационных потерь P_{rad} может приходиться до половины мощности нагрева плазмы при низкой и умеренной плотности $((2-6) \cdot 10^{19} \text{ m}^{-3})$ [11], получим и близкие значения электронной температуропроводности. Полученные аналогичным образом значения ионной температуропроводности представлены в таблице, как и оценки по неоклассическим формулам [12].

На токамаке Глобус-М2 инжекция пучка дейтерия в дейтериевую плазму позволяет получить заметно более высокие значения температуры ионов, чем при нагреве дейтериевой плазмы водородным пучком. Анализ энергобаланса плазмы показал, что время удержания тепловой энергии отличается вдвое, при инжекции дейтерия оно выше и для токамака Глобус-М2 составляет 12–16.5 ms. Инжекция водородного пучка значительно менее эффективна из-за высоких теплотерь по ионному каналу. В этом случае средняя ионная температуропроводность χ_i более чем в 3 раза выше, чем при инжекции дейтерия, и так же в 3–4 раза выше величины ионной температуропроводности, рассчитанной с помощью неоклассической теории (см. таблицу). Исследование причин наблюдаемого феномена представляет значительный интерес и требует более детального комплексного анализа.

Благодарности

Эксперименты проведены на УНУ „Сферический токамак Глобус-М“, входящей в состав ФЦКП „Материаловедение и диагностика в передовых технологиях“.

Финансирование работы

Расчет мощности нагрева плазмы с помощью нейтральной инжекции, а также анализ энергобаланса плазмы выполнены авторами (Г.С. Курские, И.В. Мирошников, Н.В. Сахаров, В.Б. Минаев, А.Ю. Тельнова, Н.Н. Бакhareв, Е.О. Киселев, Н.С. Жильцов, П.Б. Щеголев, Е.Е. Ткаченко) при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 24-12-00162).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] S.M. Kaye, J.W. Connor, C.M. Roach, *Plasma Phys. Control Fusion*, **63**, 123001 (2021). DOI: 10.1088/1361-6587/ac2b38
- [2] A.A. Galeev, R.Z. Sagdeev, *Adv. Plasma Phys.*, **6**, 311 (1976). <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1976app.book.311G/abstract>
- [3] M. Valovic, R. Akers, M. de Bock, J. McCone, L. Garzotti, C. Michael, G. Naylor, A. Patel, C.M. Roach, R. Scannell, M. Turnyanskiy, M. Wisse, W. Guttenfelder, J. Candy and the MAST Team, *Nucl. Fusion*, **51**, 073045 (2011). DOI: 10.1088/0029-5515/51/7/073045
- [4] S.M. Kaye, S. Gerhardt, W. Guttenfelder, R. Maingi, R.E. Bell, A. Diallo, B.P. LeBlanc, M. Podesta, *Nucl. Fusion*, **53**, 063005 (2013). DOI: 10.1088/0029-5515/53/6/063005
- [5] G.S. Kurskiev, V.K. Gusev, N.V. Sakharov, Y. Petrov, N.N. Bakharev, I.M. Balachenkov, A.N. Bazhenov, F.V. Chernyshev, N.A. Khromov, E.O. Kiselev, S.V. Krikunov, V.B. Minaev, I.V. Miroshnikov, A.N. Novokhatskii, N.S. Zhiltsov, E.E. Mukhin, M.I. Patrov, K.D. Shulyatiev, P.B. Shchegolev, O.M. Skrekel, A.Yu. Telnova, E.E. Tkachenko, E.A. Tukhmeneva, V.A. Tokarev, S.Yu. Tolstyakov, V.I. Varfolomeev, A.V. Voronin, V.Yu. Goryainov, V.V. Bulanin, A.V. Petrov, A.M. Ponomarenko, A.Yu. Yashin, A.A. Kavin, E.G. Zhilin, V.A. Solovey, *Nucl. Fusion*, **62**, 016011 (2022). DOI: 10.1088/1741-4326/ac38c9
- [6] G.S. Kurskiev, N.V. Sakharov, V.K. Gusev, V.B. Minaev, I.V. Miroshnikov, Y. Petrov, A. Telnova, N.N. Bakharev, E.O. Kiselev, N.S. Zhiltsov, P.B. Shchegolev, I.M. Balachenkov, V.I. Varfolomeev, A.V. Voronin, V.Yu. Goryainov, V.V. Dyachenko, E.G. Zhilin, M.V. Ilianova, A.A. Kavin, A.N. Konovalov, S.V. Krikunov, K.M. Lobanov, A.D. Melnik, A.B. Mineev, A.N. Novokhatsky, M.I. Patrov, A.V. Petrov, A.M. Ponomarenko, O.M. Skrekel, V.A. Solovei, V.V. Solokha, E.E. Tkachenko, V.A. Tokarev, S.Yu. Tolstyakov, E.A. Tukhmeneva, E.M. Khilkevitch, N.A. Khromov, F.V. Chernyshev, A.E. Shevelev, K.D. Shulyatev, A.Yu. Yashin, *Plasma Phys. Rep.*, **49**, 403 (2023). DOI: 10.1134/S1063780X23600214
- [7] G.S. Kurskiev, I.V. Miroshnikov, N.V. Sakharov, V.K. Gusev, Y. Petrov, V.B. Minaev, I.M. Balachenkov, N.N. Bakharev, F.V. Chernyshev, V.Yu. Goryainov, A.A. Kavin, N.A. Khromov, E.O. Kiselev, S.V. Krikunov, K.M. Lobanov, A.D. Melnik, A.N. Novokhatskii, S.V. Filippov, N.S. Zhiltsov, A.B. Mineev, E.E. Mukhin, M.I. Patrov, A.V. Petrov, A.M. Ponomarenko, V.V. Solokha, K.D. Shulyatiev, P.B. Shchegolev, O.M. Skrekel, A.Yu. Telnova, E.E. Tkachenko, E.A. Tukhmeneva, V.A. Tokarev, S.Yu. Tolstyakov, V.I. Varfolomeev, A.V. Voronin, A.Yu. Yashin, V.A. Solovey, E.G. Zhilin, *Nucl. Fusion*, **62**, 104002 (2022). DOI: 10.1088/1741-4326/ac881d
- [8] S.A.M. McNamara, O. Asunta, J. Bland, P.F. Buxton, C. Colgan, A. Dnestrovskii, M. Gemmel, M. Gryaznevich, D. Hoffman, F. Janky, J.B. Lister, H.F. Lowe, R.S. Mirfayzi, G. Naylor, V. Nemytov, J. Njau, T. Pyragius, A. Rengle, M. Romanelli, C. Romero, M. Sertoli, V. Shevchenko, J. Sinha, A. Sladkomedova, S. Sridhar, Y. Takase, P. Thomas, J. Varje,

- B. Vincent, H.V. Willett, J. Wood, D. Zakhar, D.J. Battaglia, S.M. Kaye, L.F. Delgado-Aparicio, R. Maingi, D. Mueller, M. Podesta, E. Delabie, B. Lomanowski, O. Marchuk and the ST40 Team, *Nucl. Fusion*, **63**, 054002 (2023). DOI: 10.1088/1741-4326/acbec8
- [9] S.M. Kaye, M. Sertoli, P. Buxton, A. Dnestrovskii, S. McNamara, M. Romanelli, P. Thomas, *Plasma Phys. Control. Fusion*, **65**, 095012 (2023). DOI: 10.1088/1361-6587/ace849
- [10] A. Pankin, D. McCune, R. Andre, G. Bateman, A. Kritiz, *Comput. Phys. Commun.*, **159**, 157 (2004). DOI: 10.1016/j.cpc.2003.11.002
- [11] Е.А. Тухменева, Н.Н. Бахарев, В.И. Варфоломеев, В.К. Гусев, Н.С. Жильцов, Е.О. Киселев, Г.С. Курский, В.Б. Минаев, Ю.В. Петров, Н.В. Сахаров, А.Д. Сладкомедова, А.Ю. Тельнова, С.Ю. Толстяков, П.Б. Щеголев, *Письма в ЖТФ*, **47** (2), 9 (2021). DOI: 10.21883/PJTF.2021.02.50537.18471 [E.A. Tukhmeneva, N.N. Bakharev, V.I. Varfolomeev, V.K. Gusev, N.S. Zhiltsov, E.O. Kiselev, G.S. Kurskiev, V.B. Minaev, Yu.V. Petrov, N.V. Sakharov, A.D. Sladkomedova, A.Yu. Telnova, S.Yu. Tolstyakov, P.B. Shchegolev, *Tech. Phys. Lett.*, **47**, 56 (2021). DOI: 10.1134/S1063785021010272].
- [12] W.A. Houlberg, K.C. Shaing, S.P. Hirshman, M.C. Zarnstorff, *Phys. Plasmas*, **4**, 3230 (1997). DOI: 10.1063/1.872465