

04

## Первые результаты исследований ионного теплопереноса на сферическом токамаке Глобус-М2

© А.Ю. Тельнова, И.В. Мирошников, М.М. Митранкова, Н.Н. Бахарев,  
В.К. Гусев, Н.С. Жильцов, Е.О. Киселев, Г.С. Курскиев, В.Б. Минаев, Ю.В. Петров,  
Н.В. Сахаров, П.Б. Щёголев, Е.А. Тюхменева

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия  
E-mail: anna.telnova@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 16 ноября 2020 г.  
В окончательной редакции 9 января 2021 г.  
Принято к публикации 5 февраля 2021 г.

Представлены результаты первых измерений профиля ионной температуры на новом сферическом токамаке Глобус-М2, полученные в разрядах с нейтральной инжекцией с помощью диагностики спектроскопии перезарядки и анализатора спектра атомов перезарядки. На основании полученных экспериментальных профилей ионной температуры с помощью кода ASTRA проведено моделирование, результаты которого указывают на преимущественно неоклассический характер ионного теплопереноса.

**Ключевые слова:** термоядерный синтез, транспортный анализ, нагрев плазмы с помощью нейтральной инжекции, ионный теплоперенос, сферический токамак.

DOI: 10.21883/PJTF.2021.09.50903.18618

Исследование процессов переноса в токамаке представляет собой одну из фундаментальных задач в современной физике плазмы, решение которой позволит приблизиться к практическому использованию термоядерных установок. Преимуществом сферических токамаков (помимо компактных размеров и соответственно меньшей стоимости) является преобладание неоклассического теплопереноса ионов в H-режиме [1–6] (а для токамака Глобус-М в некоторых случаях и в L-режиме [7]), т.е. меньших потерь тепла из плазмы, по сравнению с классическими токамаками, где преобладает аномальный перенос ионов. Глобус-М2 — новый компактный сферический токамак [8], который является модернизированной версией токамака Глобус-М [9] (с аспектным отношением  $A = 1.5$ , большим радиусом  $R = 0.36$  м, малым радиусом  $a = 0.24$  м). В результате реконструкции проектные параметры установки были двукратно увеличены, и тороидальное магнитное поле  $B_T$  и ток плазмы  $I_P$  могут быть увеличены до 1 Т и 500 кА соответственно. Помимо модернизации электромагнитной системы и систем питания был расширен диагностический комплекс установки [10]. Одними из ключевых нововведений стали расширение пространственного диапазона измерения ионной температуры с помощью спектроскопии перезарядки (CXRS — charge exchange recombination spectroscopy) по сравнению с предыдущими экспериментами [11] и модернизация комплекса анализаторов атомов перезарядки NPA (NPA — neutral particle analyzer) [12]. В результате этого на установке появилась современная диагностическая база для анализа поведения ионного компонента плазмы. Настоящая работа посвящена первым результатам исследования ионного теплопереноса в разрядах с допол-

нительным нагревом плазмы с помощью нейтральной инжекции на сферическом токамаке Глобус-М2 (УНУ „Сферический токамак Глобус-М“, входящей в состав ФЦКП „Материаловедение и диагностика в передовых технологиях“, уникальный идентификатор проекта RFMEFI62119X0021).

Эксперименты проводились в дейтериевой плазме при токе 200 кА, тороидальном магнитном поле 0.7 Т, среднечордовая плотность электронов на квазистационарной стадии разряда составляла  $\sim 4 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ . Вытянутость в данном разряде была достаточно низкая  $k = 1.55$ . Для дополнительного нагрева плазмы использовался дейтериевый пучок атомов с энергией частиц 27 keV, мощность 0.75 MW.

Измерения ионной температуры  $T_i$  с помощью CXRS осуществлялись по семи расположенным в экваториальной плоскости установки хордам наблюдения (рис. 1), пересекающим ось инжекции пучка в точках с координатами большого радиуса плазмы  $R$ , указанными в таблице. Подробности обработки сигналов CXRS приведены в [11]. Значения ионной температуры на границе плазмы ( $R = 55–59$  см) рассчитываются на осно-

Хорды измерения ионной температуры для CXRS

Номер хорды	$R$ , cm
1	36.3
2	39.3
3	42.4
4	45.4
5	48.2
6	50.8
7	53.3

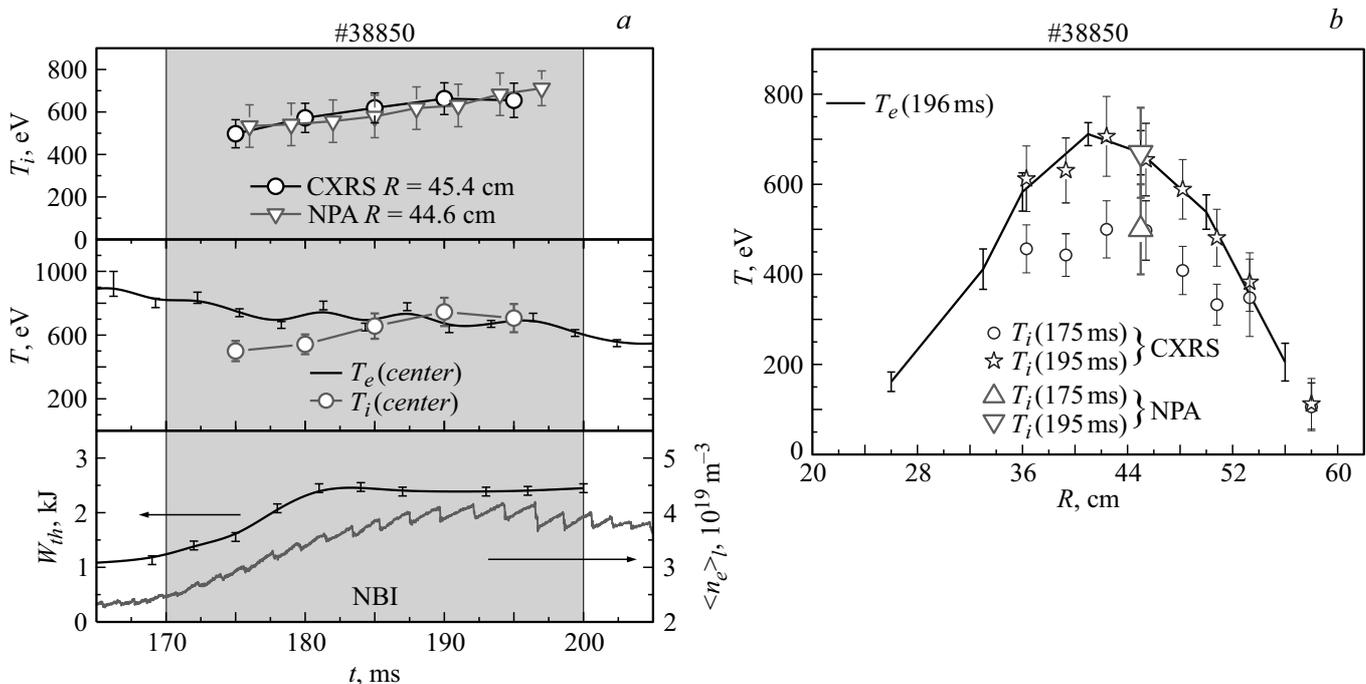


**Рис. 1.** Схема проведения эксперимента. Показаны линии наблюдения CXRS, направление наблюдения анализатора атомов перезарядки (NPA) и ось инжекции нейтрального пучка (NBI).

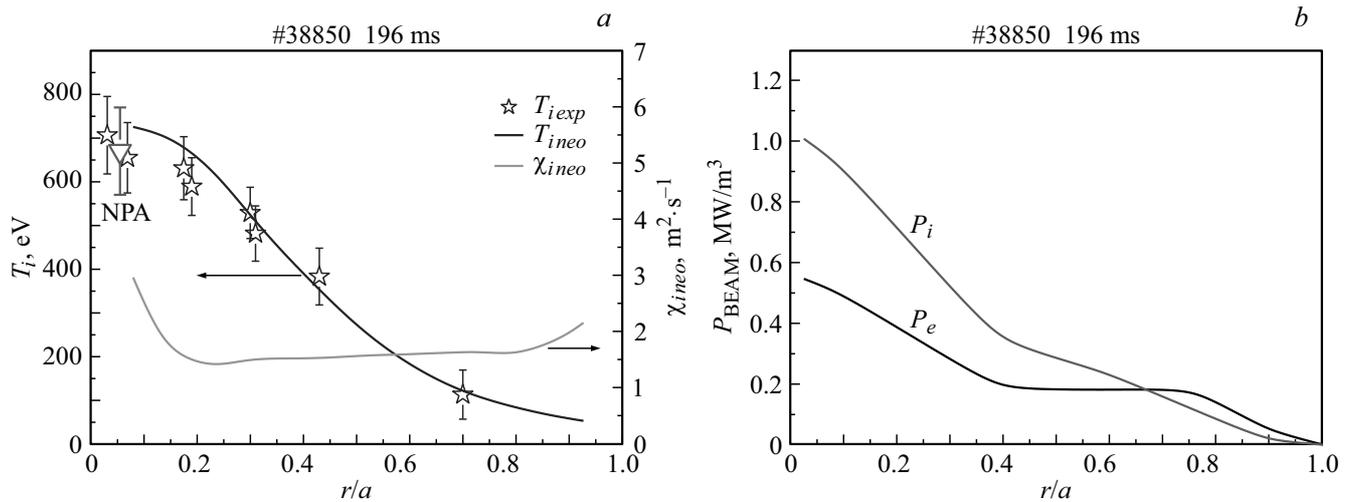
ве анализа пассивного сигнала CXRS, обусловленного излучением ионов  $C^{5+}$  из периферийной области плазменного шнура вблизи сепаратрисы. Зона локализации ионов  $C^{5+}$  является достаточно узкой, а максимум их концентрации расположен в области электронных температур порядка 100–130 eV. Измерения с помощью NPA АКОРД-24М проводились в течение всего разряда на  $R = 44.6$  cm [12]. Измерения профилей электронной

температуры и плотности осуществлялись с помощью диагностики томсоновского рассеяния [13].

На рис. 2, *a* представлен временной ход ионной температуры в центральной области плазмы в одном из разрядов экспериментальной серии #38850, измеренной с помощью CXRS (хорда  $R = 45.4$  cm) и NPA (хорда  $R = 44.6$  cm). Видно, что результаты, полученные с помощью двух независимых диагностик, очень близки и лежат в пределах экспериментальной погрешности измерений. Также на рис. 2, *a* представлены временной ход центральной электронной и ионной температуры, а также динамика теплового энергозапаса плазмы и среднехордовой плотности. Видно, что центральная ионная и электронная температура сравниваются через 15 ms после начала инжекции, а также, что электронная температура уменьшается вследствие значительного роста плотности (рис. 2). Энергозапас плазмы увеличивается с началом инжекции более чем в 2 раза. Однако величина теплового энергозапаса в целом невелика вследствие низкой вытянутости плазмы. Профили ионной температуры для моментов времени  $t = 175$  и  $195$  ms представлены на рис. 2, *b*, на котором также приведен профиль электронной температуры, соответствующий квазистационарной стадии разряда ( $t = 196$  ms). В результате инжекции пучка ионная температура в центре увеличивается до 700 eV, и у профиля появляется выраженный максимум. Профиль электронной температуры в этом режиме на квазистационарной стадии разряда почти точно соответствует профилю ионной, в центре значение электронной температуры составляет около 700 eV.



**Рис. 2.** *a* — временной ход параметров плазмы: ионной температуры, измеренной с помощью CXRS (хорда  $R = 45.4$  cm) и NPA (хорда  $R = 44.6$  cm); центральной ионной и электронной температуры; теплового энергозапаса плазмы и среднехордовой плотности. *b* — изменение во времени профиля ионной температуры и профиль электронной температуры.



**Рис. 3.** *a* — профили ионной температуры (экспериментальный и рассчитанный по неоклассической теории) и ионная температуропроводность 196 ms-разряда. *b* — рассчитанные профили поглощенной мощности пучка для электронов и ионов.

Моделирование переноса тепла на основе полученных экспериментальных данных было проведено с помощью кода ASTRA [14]. При моделировании для ионного компонента плазмы решалась прямая транспортная задача: коэффициенты температуропроводности выбирались исходя из предположения о неоклассическом механизме переноса тепла ионами в плазме и рассчитывались с помощью блока NCLASS [15]. На основании этих расчетов строился профиль ионной температуры, который сравнивался с данными экспериментальных измерений (рис. 3, *a*). Для электронного компонента плазмы решалась обратная транспортная задача: на основании измеренных температуры и плотности плазмы рассчитывались коэффициенты температуропроводности. В качестве граничного условия для решения уравнения равновесия задавались параметры последней замкнутой магнитной поверхности, полученные с помощью кода EFIT [16]. Эффективный заряд плазмы был определен на основании измерения тормозного излучения плазмы и составлял  $\sim 3$  (для  $t = 196$  ms) [17], основной примесью считался углерод. Поглощенная мощность пучка рассчитывалась с помощью блока NBI [18], при этом делались поправки на потери быстрых частиц [19]. Поглощенная мощность пучка составила порядка 210 kW (120 kW поглотилось ионами, 90 kW — электронами), соответствующие профили приведены на рис. 3, *b*. Полученные профили поглощенной мощности пучка схожи с профилями, получаемыми в расчетах для токамака Глобус-М, вследствие близких экспериментальных условий. Омическая мощность в разряде составляла около 260 kW. Рассчитанный профиль ионной температуры  $T_i$  (рис. 3, *a*) хорошо согласуется с измеренным экспериментально, что подтверждает применимость неоклассической теории к описанию переноса тепла ионами в данном эксперименте. На рис. 3, *a* также

представлен соответствующий профилю  $T_i$  коэффициент температуропроводности  $\chi_{i neo}$ .

Таким образом, на токамаке Глобус-М2 появился новый диагностический инструмент для анализа поведения ионного компонента плазмы (NPA и CXRS). Анализ накопленных данных показывает, что измерения ионной температуры с помощью CXRS хорошо согласуются с измерениями NPA. Результаты моделирования подтверждают выводы исследований, проводимых ранее на токамаке Глобус-М [4–7]. В дальнейшем на токамаке Глобус-М2 планируются эксперименты с параметрами, максимально близкими к проектным [8], что позволит более подробно исследовать ионный теплоперенос и проверить результаты предсказательного моделирования, приведенные в [8]. Проведенные в настоящей работе оценки транспортных процессов в сферическом токамаке Глобус-М2 в текущих экспериментальных условиях демонстрируют преимущественно неоклассический ионный теплоперенос.

### Финансирование работы

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (№ 0040-2019-0023).

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] H. Meyer, A.R. Field, R.J. Akers, C. Brickley, N.J. Conway, A. Patel, P.G. Carolan, C. Challis, G.F. Counsell, G. Cunningham, P. Helander, A. Kirk, B. Lloyd, R. Maingi, M.R. Tournianski, M.J. Walsh and the MAST and NBI teams, Plasma. Phys. Control. Fusion, **46**, A291 (2003). doi.org/10.1088/0741-3335/46/5A/032

- [2] A.R. Field, R.J. Akers, D.J. Applegate, C. Brickley, P.G. Carolan, C. Challis, N.J. Conway, S.C. Cowley, G. Cunningham, N. Joiner, H. Meyer, A. Patel, C. Roach, M. Valovič, M.J. Walsh and the MAST team, in *20th IAEA Fusion Energy Conf.* (Vilamoura, Portugal, 2004), EX/P2-11. <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.483.743&rep=rep1&type=pdf>
- [3] S.M. Kaye, F.M. Levinton, D. Stutman, K. Tritz, H. Yuh, M.G. Bell, R.E. Bell, C.W. Domier, D. Gates, W. Horton, J. Kim, B.P. LeBlanc, N.C. Luhmann, Jr, R. Maingi, E. Mazzucato, J.E. Menard, D. Mikkelsen, D. Mueller, H. Park, G. Rewoldt, S.A. Sabbagh, D.R. Smith, W. Wang, *Nucl. Fusion*, **47**, 499 (2007). doi.org/10.1088/0029-5515/47/7/001
- [4] G.F. Avdeeva, I.V. Miroshnikov, N.N. Bakharev, G.S. Kurskiev, M.I. Patrov, V.Yu. Sergeev, P.B. Schegolev, *J. Phys.: Conf. Ser.*, **666**, 012002 (2016). doi.org/10.1088/1742-6596/666/1/012002
- [5] А.Ю. Тельнова, Г.С. Курскиев, И.В. Мирошников, Г.Ф. Авдеева, Н.Н. Бахарев, В.К. Гусев, В.Б. Минаев, А.Д. Мельник, Ю.В. Петров, Н.В. Сахаров, Ф.В. Чернышев, П.Б. Щёголев, *Письма в ЖТФ*, **44** (15), 100 (2018). DOI: 10.21883/PJTF.2018.15.46447.17330 [Пер. версия: 10.1134/S1063785018080126].
- [6] A.Yu. Telnova, G.S. Kurskiev, I.V. Miroshnikov, N.V. Sakharov, E.O. Kiselev, M.M. Larionova, N.N. Bakharev, D.M. Larionova, V.K. Gusev, N.A. Khromov, V.B. Minaev, M.I. Patrov, Yu.V. Petrov, A.D. Sladkomedova, P.B. Shchegolev, V.A. Tokarev, S.Yu. Tolstyakov, E.A. Tukhmenova, *Plasma Phys. Control. Fusion*, **62**, 045011 (2020). doi.org/10.1088/1361-6587/ab6da5
- [7] I.Yu. Senichenkov, V.A. Rozhansky, A.V. Bogomolov, V.K. Gusev, N.V. Sakharov, Yu.V. Petrov, V.B. Minaev, S.Yu. Tolstyakov, M.I. Patrov, F.V. Chernyshev, B.B. Ayushin, G.S. Kurskiev and the Globus-M team, in *Proc. 35th EPS Conf. on plasma physics. Europhysics conference abstracts* (Hersonissos, 2008), vol. 32D, P-2.046 [http://epsppd.epfl.ch/Hersonissos/pdf/P2\\_046.pdf](http://epsppd.epfl.ch/Hersonissos/pdf/P2_046.pdf)
- [8] 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. Kononov, 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). doi.org/10.1088/1741-4326/aa69e0
- [9] В.К. Гусев, В.Е. Голант, Е.З. Гусаков, В.В. Дьяченко, М.А. Ирзак, В.Б. Минаев, Е.Е. Мухин, А.Н. Новохацкий, К.А. Подушникова, Г.Т. Раздобарин, Н.В. Сахаров, Е.Н. Трегубова, В.С. Узлов, О.Н. Щербинин, В.А. Беляков, А.А. Кавин, Ю.А. Косцов, Е.Г. Кузьмин, В.Ф. Сойкин, Е.А. Кузнецов, В.А. Ягнов, *ЖТФ*, **69** (9), 58 (1999). <https://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/36172> [Пер. версия: 10.1134/1.1259469].
- [10] 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. Курскиев, А.Д. Мельник, В.Б. Минаев, И.В. Мирошников, А.Н. Новохацкий, М.И. Патров, Ю.В. Петров, Н.В. Сахаров, О.М. Скrekель, 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. Щёголев, *Физика плазмы*, **46** (7), 579 (2020). DOI: 10.31857/S036729212007001X [Пер. версия: 10.1134/S1063780X20070016].
- [11] M.M. Larionova, I.V. Miroshnikov, V.K. Gusev, V.B. Minaev, M.I. Patrov, Yu.V. Petrov, N.V. Sakharov, P.B. Schegolev, A.Yu. Telnova, N.N. Bakharev, *J. Phys.: Conf. Ser.*, **1400**, 077018 (2019). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1400/7/077018>
- [12] N.N. Bakharev, F.V. Chernyshev, V.K. Gusev, E.O. Kiselev, G.S. Kurskiev, M.M. Larionova, A.D. Melnik, V.B. Minaev, M.I. Mironov, I.V. Miroshnikov, Yu.V. Petrov, N.V. Sakharov, P.B. Shchegolev, O.M. Skrekel, A.Yu. Telnova, E.A. Tukhmenova, V.I. Varfolomeev, *Plasma Phys. Control. Fusion*, **62**, 125010 (2020). <https://doi.org/10.1088/1361-6587/abbe32>
- [13] Г.С. Курскиев, 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*, вып. 2, 81 (2012). [http://vant.iterru.ru/vant\\_2012\\_2/7.pdf](http://vant.iterru.ru/vant_2012_2/7.pdf)
- [14] G.V. Pereverzev, P.N. Yushmanov, *ASTRA (Automated System for TRansport Analysis), Max-Planck report IPP 5/98* (2002). [https://w3.pppl.gov/hammett/work/2009/Astra\\_ocr.pdf](https://w3.pppl.gov/hammett/work/2009/Astra_ocr.pdf)
- [15] W.A. Houlberg, K.C. Shaing, S.P. Hirshman, M.C. Zarnstorff, *Phys. Plasmas*, **4**, 3230 (1997). doi.org/10.1063/1.872465
- [16] L.L. Lao, H.St. John, R.D. Stambaugh, A.G. Kellman, W. Pfeiffer, *Nucl. Fusion*, **25**, 1611 (1985). doi.org/10.1088/0029-5515/25/11/007
- [17] E.A. Tukhmenova, 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). doi.org/10.1088/2058-6272/ab305f
- [18] A. Polevoi, H. Shirai, T. Takizuka, *JAERI -Data/Code* 97-014 (1997).
- [19] N.N. Bakharev, F.V. Chernyshev, P.R. Goncharov, V.K. Gusev, A.D. Iblyaminova, V.A. Kornev, G.S. Kurskiev, A.D. Melnik, V.B. Minaev, M.I. Mironov, M.I. Patrov, Yu.V. Petrov, N.V. Sakharov, P.B. Shchegolev, S.Yu. Tolstyakov, G.V. Zadvitskiy, *Nuclear Fusion*, **55**, 043023 (2015). doi.org/10.1088/0029-5515/55/4/043023