

ДВУМЕРНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА ПЛАЗМЫ В ТОКАМАКЕ Т-10

© 2023 г. Я. М. Аммосов^{a,b,*}, Ф. О. Хабанов^c, М. А. Драбинский^a,
А. В. Мельников^{a,b,d,**}, Л. Г. Елисеев^a, Н. К. Харчев^{a,e}, С. Е. Лысенко^a

^a НИЦ Курчатовский институт, Москва, Россия

^b Московский физико-технический институт (НИУ), Долгопрудный, Россия

^c University of Wisconsin-Madison, Madison, USA

^d НИЯУ Московский инженерно-физический институт, Москва, Россия

^e Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия

*e-mail: ammosov.ium@phystech.edu

**e-mail: melnikov_07@yahoo.com

Поступила в редакцию 02.06.2023 г.

После доработки 04.07.2023 г.

Принята к публикации 12.07.2023 г.

Зондирование плазмы пучком тяжелых ионов (ЗПТИ) – уникальная диагностика, позволяющая измерять электрический потенциал высокотемпературной плазмы ϕ и его колебания $\dot{\phi}$, а также колебания плотности \tilde{n}_e и полоидального магнитного поля \tilde{B}_{pol} плазмы. Положение точки измерения в вертикальном сечении плазмы зависит от энергии пучка и угла его влета в плазму. Вариация этих двух параметров позволяет построить двумерную детекторную сетку – область возможных измерений. Результат измерений по детекторной сетке представляет собой двумерное распределение параметра плазмы. В работе приведены двумерные распределения электрического потенциала плазмы в омической и ЭЦР-стадиях разряда токамака Т-10 для режима с магнитным полем на оси $B_t = 2.2$ Тл, током плазмы $I_{pl} = 230$ кА, среднечордовой плотностью $\bar{n}_e \approx 1.1 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$ и нецентральной ЭЦР-нагревом мощностью $P_{ECRH} = 1.7$ МВт.

Ключевые слова: токамак Т-10, зондирование плазмы пучком тяжелых ионов, двумерное распределение параметров плазмы, электрический потенциал, радиальное электрическое поле

DOI: 10.31857/S0367292123600656, **EDN:** ERYZPV

ВВЕДЕНИЕ

Токамак Т-10 ($R = 1.5$ м, $a = 0.3$ м, $B_t \leq 2.5$ Тл, $I_{pl} \leq 300$ кА, $\bar{n}_e \leq 6 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$) оснащен диагностикой зондирования пучком тяжелых ионов (ЗПТИ), что позволяет независимо и одновременно исследовать ряд параметров плазмы: электрический потенциал ϕ [1] и его колебания $\dot{\phi}$, а также колебания плотности \tilde{n}_e [2] и полоидального магнитного поля \tilde{B}_{pol} плазмы [3, 4].

Принцип работы диагностики состоит в следующем. Пучок однократно заряженных ионов таллия Tl^+ инжектируется в плазму, где вторично ионизуется электронным ударом. В результате образуется веер вторично ионизованных частиц Tl^{++} , часть которого попадает в энергетический анализатор. Электрический потенциал в области измерений ϕ_{SV} (SV – Sample Volume) равен разнице энергий (с точностью до заряда электрона)

первичных зондирующих ионов E_0 и вторичных ионов E_1 , покинувших плазму: $\phi_{SV} = (E_1 - E_0)/e$.

Энергия пучка в течение плазменного разряда постоянна, она определяет глубину проникновения пучка в плазму. Угол влета пучка в плазму задается напряжением отклоняющих пластин U_{scan} на входе пучка в плазму. Множество точек измерения при всех доступных углах влета пучка в плазму образует детекторную линию. Совокупность детекторных линий при всех доступных энергиях пучка образует детекторную сетку – область, внутри которой возможны измерения с помощью ЗПТИ. Детекторная сетка, покрывающая существенную часть вертикального сечения плазмы, дает принципиальную возможность построения двумерных распределений, измеряемых с помощью ЗПТИ величин. Главную трудность получения двумерных распределений представляет пространственная ограниченность детекторной

сетки, вызванная ограниченным доступом зондирующего пучка к плазме, узостью входных диагностических патрубков, затрудняющих проведение криволинейных траекторий. Первые попытки построения двумерных распределений потенциала плазмы приведены в работе [5]. На стеллараторе TJ-II были получены двумерные распределения параметров плазмы и их флуктуаций по широкой пространственной области, покрывающей большую площадь вертикального сечения плазмы [6].

Построение двумерных распределений потенциала плазмы является шагом на пути к изучению радиального и полоидального электрических полей, сведения о которых могут быть использованы для сравнения с данными других диагностик и для построения и верификации теоретических моделей. Двумерные распределения позволят изучать асимметрию распределений параметров плазмы и структуру различных мод плазменных колебаний [7].

Двумерные распределения колебаний плотности плазмы, амплитуд альфвеновской моды и моды, возбуждаемой ускоренными электронами были получены в режимах с центральным ЭЦР-нагревом ($\bar{n}_e = 0.45\text{--}0.8 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$, $P_{ECRH} = 220\text{--}470 \text{ кВт}$) и при использовании инжекционного нагрева ($\bar{n}_e = 0.9\text{--}1.3 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$, $P_{NBI} = 510 \text{ кВт}$) стелларатора TJ-II [7].

Методика построения двумерных распределений по детекторной сетке для токамака T-10 приведена в работе [8]. Помимо токамака T-10, существует возможность применения данной методики на планируемых диагностиках ЗПТИ для токамаков T-15МД [9] и Глобус-М2 [10].

В данной работе приведены результаты измерения двумерных распределений среднего значения электрического потенциала плазмы токамака T-10 в омическом режиме и режиме с нецентральной ЭЦР-нагревом.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Измерения с помощью ЗПТИ проводились в серии воспроизводимых импульсов токамака T-10 в режиме с магнитным полем на оси $B_t = 2.2 \text{ Тл}$, током плазмы $I_{pl} = 230 \text{ кА}$ и среднорядовой электронной плотностью в стационарной омической стадии разряда $\bar{n}_e \approx 1.1 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$. При этом электрический потенциал плазмы на стенках вакуумной камеры установки принимался равным 0. На периферии омической плазмы дополнительно проводились измерения электрического потенциала с помощью зонда Ленгмюра.

Измерения тока плазмы I_{pl} проводились с помощью пояса Роговского, среднорядовая электронная плотность \bar{n}_e была измерена СВЧ-интер-

ферометром по центральной хорде [11, 12], электронная температура T_e — диагностикой на основе второй гармоники электронного-циклотронного излучения. Стоит отметить, что в данном режиме плазменный шнур был смещен внутрь вакуумной камеры на 1 см относительно магнитной оси. Дополнительный СВЧ-нагрев осуществлялся двумя гиротронами, работающими на частоте 140 ГГц (нецентральный нагрев, область вложения СВЧ-мощности $r \approx 15 \text{ см}$, $P_{ECRH} = 1.7 \text{ МВт}$). В момент включения СВЧ-нагрева электронная температура не измерялась, чтобы избежать повреждения диагностики. Сценарий типичного разряда приведен на рис. 1.

Чтобы избежать развития пучков убегающих электронов [13] скорость роста тока плазмы ограничивалась — стационарная часть разряда начиналась в момент времени $t \approx 500\text{--}600 \text{ мс}$, среднорядовая электронная плотность в начале импульса возрастала, но затем спадала и выходила на плато при достижении стационарного тока плазмы.

Сразу после включения ЭЦР-нагрева плотность плазмы уменьшается вследствие эффекта выноса плотности (“density pump-out”) [14], а электронная температура $T_e(0)$ возрастает с 1.5 до 2.3 кэВ. Впоследствии плотность начинает неконтролируемо расти вследствие усиления дегазации стенок вакуумной камеры под воздействием мощного ЭЦР, что приводит к некоторому снижению электронной температуры. Профили электронной плотности и электронной температуры в омической и ЭЦР-стадиях разряда приведены на рис. 2. Профили плотности были измерены с помощью многохордового СВЧ-интерферометра. Профили температуры — с помощью многоканальной диагностики ЕСЕ [15].

Ранее с помощью ЗПТИ в описанном режиме был измерен профиль потенциала плазмы [16–18], а также были построены радиальные распределения колебаний потенциала, на которых наблюдается геодезическая акустическая мода [19–21], и радиальные распределения колебаний плотности, на которых наблюдается квазикогерентная мода [21–23].

Измерения с помощью ЗПТИ проводились в режиме сканирования, то есть точка наблюдения периодически перемещалась вдоль детекторной линии за счет изменения угла влета пучка в плазму (период $\sim 100 \text{ мс}$). Поскольку длительность сканирования меньше исследуемой стационарной фазы разряда ($\sim 350\text{--}450 \text{ мс}$), производилось осреднение по нескольким периодам сканирования. Энергия зондирующего пучка варьировалась от импульса к импульсу в диапазоне от 180 до 330 кэВ с шагом 10 кэВ. Увеличение энергии пучка на 10 кэВ приводит к сдвигу детекторной линии на $\sim 1 \text{ см}$ вглубь плазмы. Полная область измерения

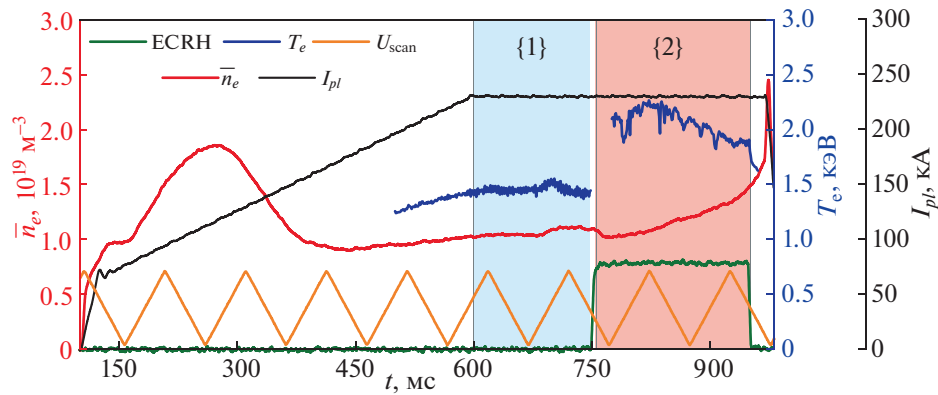


Рис. 1. Сценарий типичного исследуемого разряда #73203 ($B_t = 2.2$ Тл, $I_{pl} = 230$ кА): красная линия – среднехордовая электронная плотность (левая шкала); синяя – электронная температура (правая шкала 1); черная – ток плазмы (правая шкала 2); зеленая – индикация ЭЦР-нагрева; оранжевая – сканирующее напряжение на отклоняющих пластинах с периодом 100 мс и амплитудой от -7.6 до -2.3 кВ (шкала для величины U_{scan} не приводится); {1} – временной интервал стационарной омической стадии разряда; {2} – временной интервал стадии с нецентральной ЭЦР-нагревом мощностью $P_{ECRH} = 1.7$ МВт ($r = 15$ см).

имеет следующие пределы: по радиусу плазмы $r \sim 8\text{--}29$ см и по полоидальному углу $\theta_{pol} \sim [0^\circ, 55^\circ]$ при $r_{SV} \sim 20$ см. Площадь области измерения занимает $\sim 10\%$ от площади вертикального сечения плазменного шнура или $\sim 40\%$ сечения верхней правой четверти (рис. 3).

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

На рис. 4 приведен профиль потенциала для омической плазмы и плазмы с ЭЦР-нагревом.

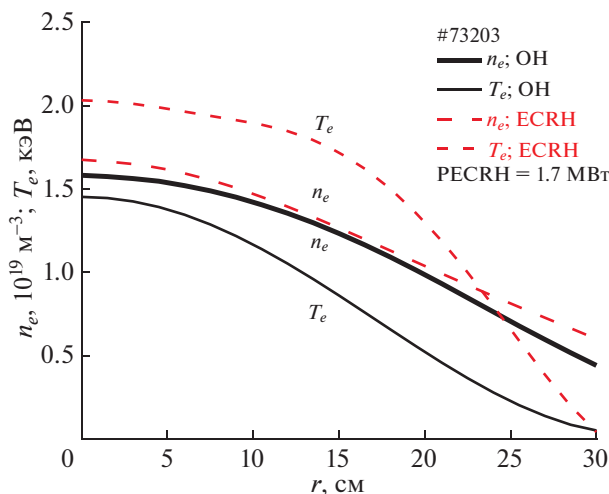


Рис. 2. Радиальные профили электронной плотности и электронной температуры плазмы для рассматриваемого режима $B_t = 2.2$ Тл, $I_{pl} = 230$ кА. Черная линия – омическая стадия; красная штриховая линия – ЭЦР-стадия разряда. Погрешности измерений $\sim 10\%$ величины.

Для обоих случаев было посчитано радиальное электрическое поле $E_r = -\Delta\phi/\Delta r$. В первом случае оно равно $E_r \sim -80$ В/см, а во втором $E_r \sim -30$ В/см. Потенциал плазмы для режима с ЭЦР-нагревом сдвигается в положительную сторону поскольку, вследствие ЭЦР-нагрева ухудшается удержание электронов [24].

На рис. 5 приведена временная эволюция среднехордовой плотности (центральная хорда) и потенциала плазмы в точке $r = 13$ см в импульсе

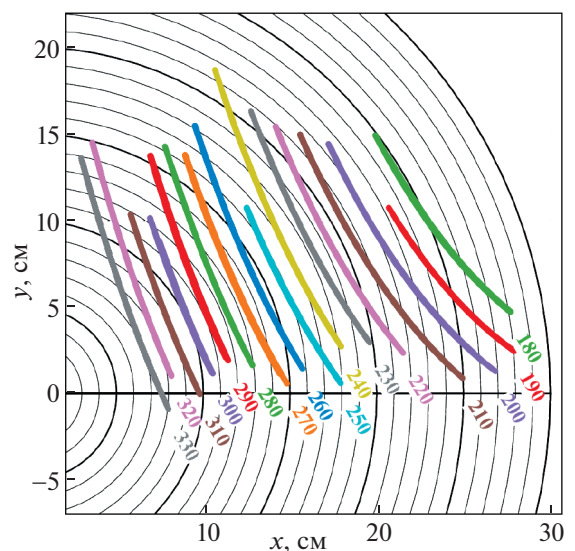


Рис. 3. Область измерения ЗПТИ для режима Т-10 с магнитным полем на оси $B_t = 2.2$ Тл, током плазмы $I_{pl} = 230$ кА. Цветом показаны детекторные линии, рассчитанные для значений энергии зондирующего пучка $E_{beam} = 180\text{--}330$ кэВ.

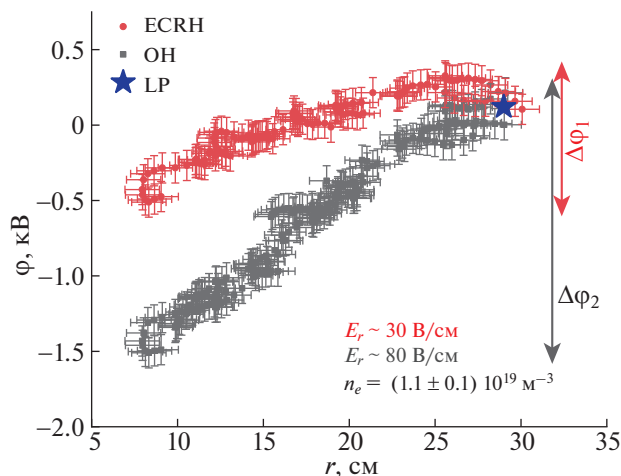


Рис. 4. Профили электрического потенциала плазмы с фиксированной среднехордовой электронной плотностью $\bar{n}_e = (1.1 \pm 0.1) \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$. Красные точки – профиль с нецентральной ЭЦР-нагревом; серые – профиль с омическим нагревом. На периферии (синей звездой) приведено измерение с помощью зонда Ленгмюра (LP). Стрелками указаны $\Delta\phi_1$, $\Delta\phi_2$ – диапазоны обоих профилей потенциала. Погрешность измерения электрического потенциала плазмы $\Delta\phi \approx \pm 0.1 \text{ кВ}$, пространственное разрешение $\Delta r \approx \pm 1 \text{ см}$.

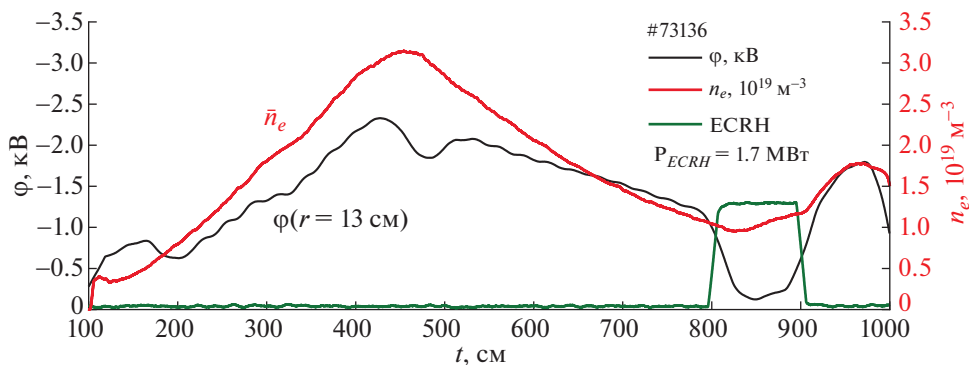


Рис. 5. Временная эволюция среднехордовой электронной плотности, электрического потенциала плазмы на $r = 13 \text{ см}$ в импульсе #73136 ($B_t = 2.2 \text{ Тл}$, $I_{pl} = 230 \text{ кА}$): черная линия – потенциал плазмы (левая шкала); красная – плотность плазмы (правая шкала); зеленая – индикация ЭЦР-нагрева. Вертикальная ось для потенциала направлена в сторону отрицательных значений.

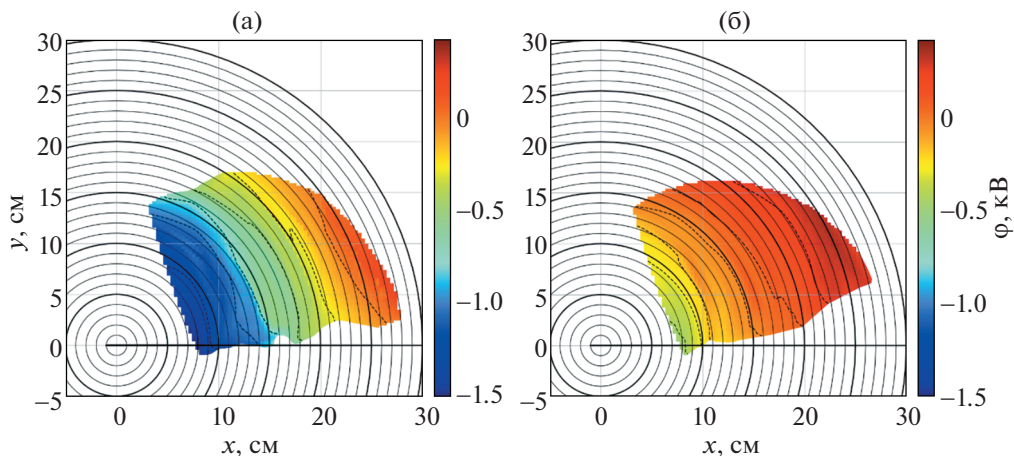


Рис. 6. Двумерные распределения электрического потенциала плазмы по данным ЗПТИ на токамаке Т-10 для режима $B_t = 2.2 \text{ Тл}$, $I_{pl} = 230 \text{ кА}$, $\bar{n}_e \approx (1.1 \pm 0.1) \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$: для омического режима (а); для режима с нецентральной ЭЦР-нагревом (б). Штриховой линией обозначены эквипотенциальные линии; цветом – значение потенциала плазмы.

#73136. Левая шкала графика, отражающая величину потенциала, имеет отрицательные значения. Так, с ростом плотности потенциал становится более отрицательным, а при включении ЭЦР-нагрева, наоборот, сдвигается в положительную сторону.

После нанесения измеренных данных на пространственную сетку была произведена билинейная интерполяция в полярных координатах. На рис. 6 приведены двумерные распределения электрического потенциала плазмы для двух режимов.

Для омического режима в центральной области плазмы ($r = 7$ см; $\rho = 0.23$) потенциал достигает значения $\varphi \approx -1500$ В, на периферии плазмы ($r = 28$ см; $\rho = 0.93$) потенциал равен $\varphi \approx +200$ В. Для режима с ЭЦР-нагревом в центральной области плазмы ($r = 7$ см; $\rho = 0.23$) потенциал достигает значения $\varphi \approx -500$ В, на периферии плазмы ($r = 27$ см; $\rho = 0.90$) потенциал равен $\varphi \approx +300$ В.

Поскольку плотность плазмы в исследованном режиме низкая ($\sim 10^{19}$ м⁻³) и газокинетическое давление вызывает незначительный шафрановский сдвиг ($\sim 1-2$ см) магнитных поверхностей, они рассматриваются в виде концентрических окружностей.

Эквипотенциальные линии согласуются с магнитными поверхностями в пределах достигнутой погрешности измерения ($\Delta\varphi \approx \pm 100$ В, $\Delta r_{SV} \approx \pm 1$ см) для обоих режимов. Потенциал симметричен в области измерений для обоих режимов. Неоднородностей в пределах достигнутой точности не обнаружено.

В случае ЭЦР-нагрева эквипотенциальные линии совпадают с магнитными поверхностями хуже, нежели в случае омического режима, поскольку диапазон профиля потенциала $\Delta\varphi_1$ уже, чем $\Delta\varphi_2$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе в режиме с магнитным полем на оси $B_t = 2.2$ Тл, током плазмы $I_{pl} = 230$ кА, среднехордовой электронной плотностью $\bar{n}_e \approx (1.1 \pm 0.1) \times 10^{19}$ м⁻³ были измерены двумерные распределения среднего значения электрического потенциала для омического режима и режима с нецентральной ЭЦР-нагревом.

Показано, что в рассмотренном режиме линии уровней потенциала согласуются с магнитными поверхностями Т-10 в пределах достигнутой погрешности измерений ($\Delta\varphi \approx \pm 100$ В, $\Delta r_{SV} \approx \pm 1$ см).

Работа частично поддержана Российским научным фондом, грант 23-72-00042.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Jobes F.C., Hickok R.L.* // Nucl. Fusion. 1970. V. 10. P. 195.
<https://doi.org/10.1088/0029-5515/10/2/015>
2. *Jobes F.C., Marshall J.F., Hickok R.L.* // Phys. Rev. Lett. 1969. V. 22. P. 1042.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.22.1042>
3. *Melnikov A.V., Eliseev L.G., Drabinskij M.A., Khabanov P.O., Kharchev N.K., Lysenko S.E., Zenin V.N., Krupnik L.I., Chmyga A.A., Deshko G.N., Khrebtov S.M., Komarov A.D., Kozachek A.S., Zhezhera A.I., Barcala J.M., Bravo A., Hidalgo C., Lopez J., Martin G., Molinero A., De Pablos J.L., Soletto A., Ufimtsev M.V.* // Nucl. Fusion. 2017. V. 57. P. 072004.
<https://doi.org/10.1088/1741-4326/aa5382>
4. *Melnikov A.V., Drabinskij M.A., Eliseev L.G., Khabanov P.O., Kharchev N.K., Krupnik L.I., De Pablos J.L., Kozachek A.S., Lysenko S.E., Molinero A., Igonkina G.B., Sokolov M.M.* // Fusion Eng. Des. 2019. V. 146. P. 850.
<https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2019.01.096>
5. *Shimizu A., Ido T., Kurachi M., Makino R., Nishiura M., Kato S., Nishizawa A., Hamada Y.* // Rev. Sci. Instrum. 2014. V. 85. P. 1.
<https://doi.org/10.1063/1.4891975>
6. *Sharma R., Khabanov P.O., Melnikov A.V., Hidalgo C., Cappa A., Chmyga A., Eliseev L. G., Estrada T., Kharchev N. K., Kozachek A.S., Krupnik L.I., Malaquias A., van Milligen B., Molinero A., de Pablos J.L., Pastor I., Zenin V.N.* // Phys. Plasmas. 2020. V. 27. P. 062502.
<https://doi.org/10.1063/1.5142996>
7. *Melnikov A.V., Eliseev L.G., Barcala J.M., Cappa A., Chmyga A., Drabinskij M.A., Hidalgo C., Khabanov P.O., Kharchev N.K., Kozachek A.S. et al.* // Plasma Phys. Control. Fusion. 2022. V. 64. P. 054009.
<https://doi.org/10.1088/1361-6587/ac5b4c>
8. *Ammosov Y.M., Khabanov F.O., Drabinskij M.A., Melnikov A.V., Eliseev L.G., Kharchev N.K., Lysenko S.E.* // MTPDA 2022. Moscow: NRNU MEPhI, 2022. P. 6.
9. *Drabinskij M.A., Melnikov A.V., Khabanov P.O., Eliseev L.G., Kharchev N.K., Ilin A.M., Sarancha G.A., Vadimov N.A.* // J. Instrum. 2019. V. 14. P. C11027.
<https://doi.org/10.1088/1748-0221/14/11/C11027>
10. *Khabanov P.O., Melnikov A.V., Minaev V.B., Komarov A.D.* // Problems Atomic Sci. Technol. Ser. Plasma Phys. 2020. V. 130. P. 195.
<https://doi.org/10.46813/2020-130-195>
11. *Bagdasarov A.A., Buzankin V.V., Vasin N.L., Gorbunov E.P., Denisov V.F., Kuleshov E.M., Savchenko V.N., Khilil' V.V., Shcherbov V.A.* // Diagnostika plazmy (Plasma diagnostics). Moscow: Energoatomizdat, 1981. V. 4. P. 141.
12. *Esipchuk Y.V., Kirneva N.A., Borschegovskij A.A., Chistyakov V.V., Denisov V.Ph., Dremine M.M., Gorbunov E.P., Grashin S.A., Kalupin D.V., Khimchenko L.N. et al.* // Plasma Phys. Control. Fusion. 2003. V. 45. P. 793.
<https://doi.org/10.1088/0741-3335/45/5/320>

13. *Grashin S.A., Arkhipov I.I., Budaev V.P., Karpov A.V., Klyuchnikov L.A., Khimchenko L.N., Melnikov A.V., Sarychev D.V., Sergeev N.S., Zemtsov I.A.* // *Fusion Eng. Des.*, 2019. V. 146B. P. 2100.
<https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2019.03.115>
14. *Andreev V.F., Borschegovskij A.A., Chistyakov V.V., Dnestrovskij Yu.N., Gorbunov E.P., Kasyanova N.V., Lysenko S.E., Melnikov A.V., Myalton T.B., Roy I.N., Sergeev D.S., Zenin V.N.* // *Plasma Phys. Control. Fusion*. 2016. V. 58. P. 055008.
<https://doi.org/10.1088/0741-3335/58/5/055008>
15. *Гридина Т.В., Валенсиа О., Питерский В.В., Плоскирев Е.Г., Плоскирев Г.Н., Позняк В.И.* // ICPAF 2011. Zvenigorod, 2011. URL: <http://www.fpl.gpi.ru/Zvenigorod/XXXVIII/Mu/ru/BX-Gridina.doc>.
16. *Melnikov A.V., Eliseev L.G., Perfilov S.V., Andreev V.F., Grashin S.A., Dyabilin K.S., Chudnovskiy A.N., Isaev M.Yu., Lysenko S.E., Mavrin V.A. et al.* // *Nucl. Fusion*. 2013. V. 53. P. 093019.
<https://doi.org/10.1088/0029-5515/53/9/093019>
17. *Melnikov A.V., Eliseev L.G., Drabinskij M.A., Grashin S.A., Khabanov P.O., Kharchev N.K., Lysenko S.E., Zenin V.N., T-10 Team* // 27th IAEA Fusion Energy Conference (FEC 2018) – IAEA CN-258. 2018. EX/P5-10. URL: <https://nucleus.iaea.org/sites/fusionportal/Shared%20Documents/FEC%202018/fec2018-preprints/preprint0058.pdf>.
18. *Melnikov A.V., Eliseev L.G., Grashin S.A., Drabinskij M.A., Khabanov P.O., Kharchev N.K., Krupin V.A., Lysenko S.E., Nemets A.R., Nurgaliev M.R., Ryzhakov D.A., Shurygin R.V., Soloviev N.A., Vershkov V.A. and T-10 Team* // 28th IAEA Fusion Energy Conference (FEC 2020). 2021. EX/6-5. URL: <https://nucleus.iaea.org/sites/fusionportal/Shared%20Documents/FEC%202020/fec2020-preprints/preprint0661.pdf>.
19. *Драбинский М.А., Елисеев Л.Г., Хабанов Ф.О., Мельников А.В., Зенин В.Н., Харчев Н.К., Грашин С.А.* // ICPAF 2018. Zvenigorod, 2018. P. 107.
20. *Drabinskij M.A., Khabanov P.O., Melnikov A.V., Eliseev L.G., Kharchev N.* // ICPAF-2021. Zvenigorod, 2021.
21. *Ammosov Y.M., Khabanov P.O., Drabinskij M.A., Melnikov A.V., Eliseev L.G., Kharchev N.K., Lysenko S.E.* // *Phys. Atomic Nucl.* 2022. V. 85. P. 2071.
<https://doi.org/10.1134/s1063778822100040>
22. *Drabinskij M.A., Eliseev L.G., Khabanov P.O., Melnikov A.V., Kharchev N.K., Sergeev N.S., Grashin S.A.* // *J. Phys. Conf. Ser.* 2019. V. 1383. P. 012004.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1383/1/012004>
23. *Drabinskij M.A., Melnikov A.V., Eliseev L.G., Khabanov P.O., Kharchev N.K., Lysenko S.E.* // *J. Phys. Conf. Ser.* 2021. V. 2055. P. 012001.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/2055/1/012001>
24. *Melnikov A.V., Krupnik L.I., Ascasibar E., Cappa A., Chmyga A.A., Deshko G.N., Drabinskij M.A., Eliseev L.G., Hidalgo C., Khabanov P.O. et al.* // *Plasma Phys. Control. Fusion*. 2018. V. 60. P. 084008.
<https://doi.org/10.1088/1361-6587/aac97f>