04.2

Первые наблюдения ионно-циклотронного излучения на сферическом токамаке Глобус-М2

© *М.С. Кулыгин, И.М. Балаченков, Н.Н. Бахарев, В.К. Гусев, Е.О. Киселёв, В.Б. Минаев, Г.С. Курскиев, Н.С. Жильцов, Ю.В. Петров, Н.В. Сахаров, А.Ю. Тельнова, П.Б. Щеголев*

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

Поступило в Редакцию 18 марта 2024 г.
В окончательной редакции 20 мая 2024 г.
Принято к публикации 28 мая 2024 г.

В токамаке Глобус-М2 при помощи магнитных зондов зарегистрировано излучение в ионно-циклотронном диапазоне частот (частота первой гармоники находится в диапазоне от 4 до 12 MHz) в разрядах с инжекцией пучка атомов высокой энергии. Наблюдаемые спектры представляют собой набор эквидистантных гармоник на частотах ионно-циклотронного резонанса для ионов водорода или дейтерия, также наблюдается нелинейная динамика частоты моды во время вспышек. В предположении, что регистрируемое излучение является ионно-циклотронным, установлена его локализация. При помощи трехкоординатного зонда определено отношение компонент магнитного поля излучения.

Ключевые слова: сферический токамак, ионно-циклотронное излучение, альфвеновская циклотронная неустойчивость.

DOI: 10.61011/PJTF.2024.18.58626.19923

Вращение ионов по ларморовским орбитам приводит к эмиссии тормозного (циклотронного) излучения. Однако в отличие от электрон-циклотронного излучения, широко применяющегося в диагностических целях [1], плазма токамака оказывается непрозрачной для циклотронного излучения отдельных ионов. Наблюдение сигналов на частотах ионно-циклотронного резонанса ($f_{ci} = eB/2\pi m_i$, где B — индукция магнитного поля, m_i — масса иона) из плазмы оказывается возможным за счет резонанса циклотронного вращения ионов с различными неустойчивостями плазмы [2]. Такое излучение (ion cyclotron emission, ICE) прежде регистрировалось на множестве установок и впервые было обнаружено в экспериментах с DT-смесью на установках TFTR [3] и позднее на JET [4]. Предполагалось, что резонанс вызывали термоядерные альфа-частицы. Эти частицы рождаются в центре плазмы и за счет большого размера своих циклотронных орбит могут создавать неравновесное распределение ионов по скоростям на периферии. Также эмиссию ионно-циклотронного излучения могут вызвать быстрые ионы, возникающие при ионно-циклотронном нагреве или при инжекции пучка атомов высокой энергии, вступающие в резонанс с плазменными неустойчивостями. Чаще всего в качестве таких неустойчивостей рассматривают магнитоакустическую или альфвеновскую циклотронную неустойчивость [5,6]. В этой модели резонансные частицы взаимодействуют с компрессионной альфвеновской волной, которая в отличие от шировой альфвеновской волны может распространяться на частотах ионно-циклотронного диапазона.

Токамак Глобус-М2 [7] — это компактный сферический токамак, обладающий следующим набором параметров: $R = 0.36$ m, $a = 0.24$ m, $A = 1.5$, $B_0 \leq 1$ T, $I_p \leq 500$ kA, где R, a — большой и малый радиусы соответственно, A — аспектное отношение, B_0 — тороидальное поле на магнитной оси, а I_p — ток плазмы. Токамак Глобус-М2 обладает обширным диагностическим комплексом [8] и системами дополнительного нагрева. Для инжекции атомов водорода или дейтерия на токамаке установлено два инжектора: NBI-1 и NBI-2, каждый мощностью $P_{beam} \approx 1$ MW, с энергией $E_{\text{NBI-1}}$ до 30 keV, $E_{\text{NBI-2}}$ до 50 keV соответственно [9]. На токамаке установлена диагностика томсоновского рассеяния, которая обеспечивает измерения профилей концентрации и температуры в 11 пространственных точках и с частотой следования импульсов 330 Hz [10]. Для регистрации магнитогидродинамических (МГД) возмущений применяются массивы магнитных зондов, установленные вдоль тороидального и полоидального обхода. Тороидальный массив состоит из восьми быстрых магнитных катушек, установленных равномерно по тороидальному обходу камеры токамака под углом 45° относительно друг друга и регистрирующих полоидальную компоненту магнитного потока. Зонды установлены внутри вакуумной камеры и защищены от тепловых потоков графитовыми плитками, зазоры между которыми позволяют электромагнитному излучению высокой частоты проникать в область установки зондов. Оцифровка сигнала с зондов производится на частотах до 250 MHz, что позволяет регистрировать излучение в ионно-циклотронном диапазоне частот. Полоидальный массив зондов сформирован из 16 зондов, регистрирующих полоидальную компоненту магнитного потока. Сами зонды представляют собой катушки с намотанным на них тонким проводом

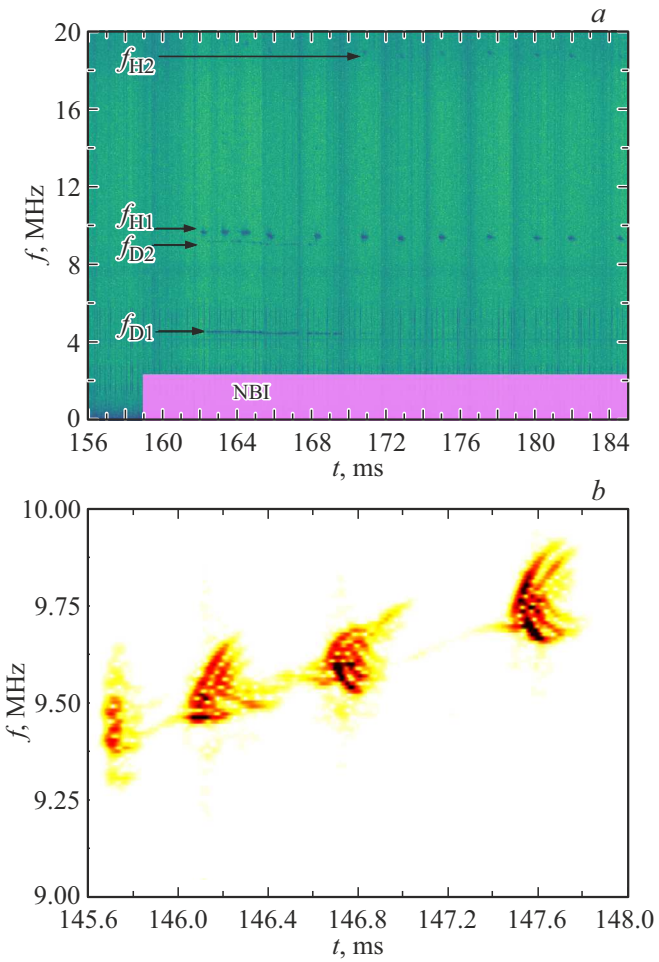

Рис. 1. *a* — спектрограмма сигнала магнитного зонда #42663 ($I_p = 235\,\text{kA}$, $B = 0.75\,\text{T}$, $P_{beam} = 0.67\,\text{MW}$, $E_{\text{NBI}} = 26\,\text{keV}$); *b* — спектрограмма сигнала магнитного зонда #42358 ($I_p = 360\,\text{kA}$, $B = 0.9\,\text{T}$, $P_{beam} = 1.12\,\text{MW}$, $E_{\text{NBI}} = 45\,\text{keV}$).

с полиимидной изоляцией, закрытые пластинами нитрида бора (α-BN). Для определения структуры МГД-возмущений (соотношения между компонентами магнитного поля) используется трехкоординатный зонд, состоящий из трех катушек, ориентированных нормально к различным компонентам магнитного потока. Катушки трехкоординатного зонда по конструкции аналогичны зондам тороидального массива.

При помощи быстродействующих магнитных зондов на токамаке Глобус-М2 в разрядах с инжекцией атомного пучка впервые были обнаружены колебания на частотах ионно-циклотронного резонанса для дейтерия (4–6 MHz), а также на частоте ионно-циклотронного резонанса для водорода (8–12 MHz). Помимо этого наблюдались кратные гармоники (рис. 1, *a*). Регистрация излучения в ионно-циклотронном частотном диапазоне на токамаке Глобус-М2 стала возможна благодаря модернизации магнитной зондовой диагностики. В рамках модернизации было увеличено количество тороидальных магнитных зондов до восьми штук, а также увеличена частота оцифровки до 250 MHz. Поскольку ионно-циклотронное излучение может быть использовано для диагностики параметров быстрых частиц [11], исследование ICE представляет интерес как для токамаков реакторного типа, так и для компактных установок.

Ионно-циклотронные гармоники наблюдались во время инжекции дейтериевого или водородного пучка в дейтериевую или водородную плазму в диапазоне параметров разряда $300 < I_p < 400\,\text{kA}$, $0.7 < B_0 < 0.9\,\text{T}$ и в широком диапазоне концентрации ($n_e = 10^{18} - 10^{20}\,\text{m}^{-3}$). Типичная спектрограмма разряда, где наблюдались ICE, представлена на рис. 1, *a*. В разряде #42663 ($I_p = 235\,\text{kA}$, $B = 0.75\,\text{T}$) инжекция водорода в дейтериевую плазму осуществлялась при помощи инжектора NBI-1 ($P_{beam} = 0.67\,\text{MW}$, $E_{\text{NBI}} = 26\,\text{keV}$) в промежуток времени 160–185 ms. Через 2 ms после начала инжекции начинает развиваться продолжительная мода на частоте ионно-циклотронного резонанса. На рис. 1, *a* также показаны первые две гармоники водорода и дейтерия.

В отдельных разрядах наблюдался вспышечный характер развития моды. Так, например, в разряде #42358 ($I_p = 360\,\text{kA}$, $B_0 = 0.9\,\text{T}$, $n_e = 5 \cdot 10^{19}\,\text{m}^{-3}$) во время инжекции атомного пучка при помощи инжектора NBI-2 ($P_{beam} = 1.12\,\text{MW}$, $E_{\text{NBI}} = 45\,\text{keV}$, инжекция производилась в интервале 130–230 ms) наблюдалось быстрое изменение частоты моды (рис. 1, *b*), связанное с нелинейным взаимодействием с волнами в плазме резонансных частиц, обладающих неравновесным распределением (так называемый „чирпинг“(chirping)) [12]. Наблюдение этого эффекта свидетельствует в пользу того, что эмиссия ICE происходит в результате взаимодействия плазменной волны с быстрыми частицами. Ранее на токамаке Глобус-М чирпинг наблюдался для тороидальных альфвеновских мод (TAE), колебаний в субциклотронном диапазоне и в диапазоне частот геликонов [13].

Для определения структуры волны использовались сигналы трехкоординатного зонда. В результате измерений было получено соотношение тороидальной, полоидальной и радиальной компонент магнитного потока во время наблюдения ICE. На рис. 2, *a* показано соотношение возмущенных тороидальной и полоидальной (касательной к магнитной поверхности) компонент магнитного поля во время отдельной вспышки ICE. Тороидальная компонента возмущения существенно превосходит полоидальную, и полученная фигура имеет форму сплюснутого эллипса, вытянутого вдоль тороидального направления. Исходя из этого можно заключить, что магнитное поле волны преимущественно направлено вдоль внешнего магнитного поля. Такое соотношение компонент магнитного поля свойственно компрессионным или магнитозвуковым волнам, в том числе компрессионной альфвеновской волне.

Считая, что данное излучение является ионно-циклотронным, можно предположить локализацию излучения. Частота, измеренная магнитным зондом, была сопоставлена с ионно-циклотронной частотой, которая была вычислена исходя из распределения магнитного

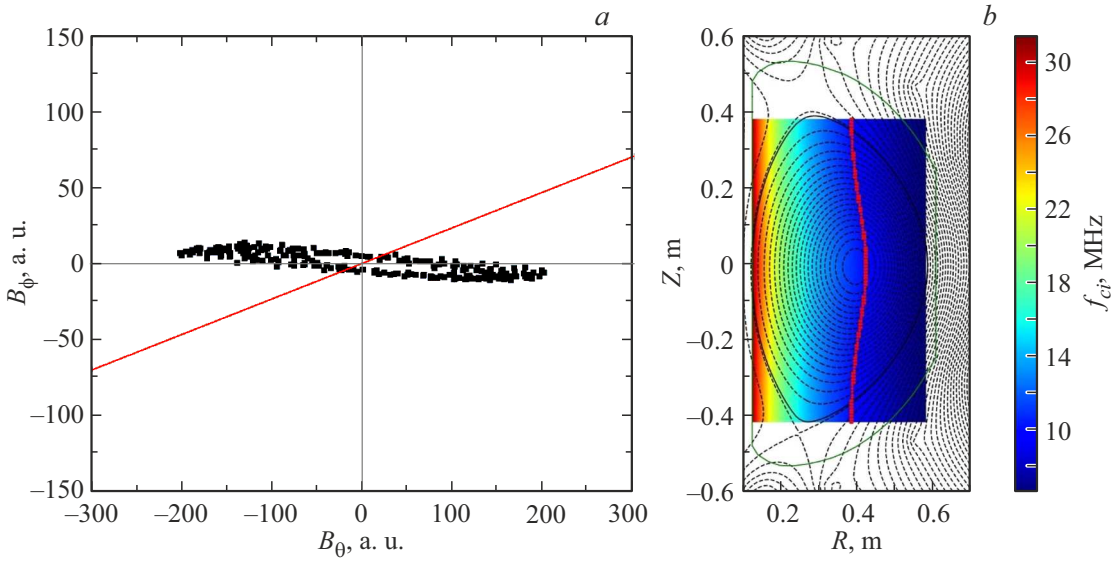

Рис. 2. Разряд #42280, 173 ms. *a* — соотношение тороидальной и полоидальной компонент возмущенного магнитного поля. Красной прямой обозначен наклон силовых линий в области установки зонда. *b* — пространственное распределение ионно-циклотронной частоты первой гармоники водорода. Сплошной красной линией обозначена частота, зарегистрированная магнитным зондом. Пунктиром обозначена магнитная конфигурация. Цветной вариант рисунка представлен в электронной версии статьи.

поля, полученного из реконструкции магнитного равновесия. Из сопоставления частот (рис. 2, *b*) следует, что колебания локализованы вблизи магнитной оси (для $f \sim 10\,\mathrm{MHz}$ $R \sim 0.4\,\mathrm{m}$).

Также при помощи зондов полоидального массива было обнаружено, что частота, регистрируемая всеми зондами, одинаковая. Это можно объяснить, предположив, что траектории частиц компактны и локализованы вблизи экваториальной плоскости, вследствие чего частота колебаний может практически не меняться при перемещении вдоль магнитной поверхности. Такое предположение уместно, если волна распространяется вдоль некоторой магнитной поверхности и возбуждается за счет резонанса с быстрыми частицами. О последнем, в частности, свидетельствует наблюдение чирпированных вспышек (рис. 1, *b*). На роль вероятных траекторий резонансных частиц в работе [14] выдвигают так называемые „стагнирующие“ траектории.

В связи с центральной локализацией излучения можно было бы предположить, что описанное выше явление чирпинга могло возникнуть в результате смещения магнитной конфигурации в сторону сильного поля. Однако характерное время изменения частоты вспышки порядка $400\,\mu$s, что в разы меньше характерного времени изменения магнитной конфигурации. Данный эффект описан в литературе и наблюдался для других неустойчивостей, в том числе для ICE [15].

Наличие локализации дает возможность определить для частоты ICE зависимости от параметров плазмы. На рис. 3, *a* представлена зависимость частоты ICE от величины магнитного поля на оси. Полученная зависимость, как и ожидается для данного излучения, является линейной. Для подтверждения этого вывода был численно рассчитан коэффициент корреляции Пирсона по следующей формуле: $r_p = S_{xy}/S_x S_y$, где S_{xy} — ковариация сигналов x и y, а S_x, S_y — стандартное отклонение для сигналов x и y соответственно. Для данной зависимости $r_p = 0.97$. Зависимость частоты от магнитного поля определялась при фиксированных значениях тока по плазме и электронной концентрации. Также определялась зависимость частоты ICE от локальной концентрации электронов, измеренной при помощи диагностики томсоновского рассеяния на радиусе локализации излучения, при постоянном магнитном поле $B = 0.8\,\mathrm{T}$. Поскольку эмиссия ICE происходит за счет резонанса надтепловых частиц с неустойчивостями плазмы, регистрируемая частота может отличаться от циклотронной частоты f_{ci} из-за зависимости от параметров плазмы, содержащихся в соответствующем дисперсионном соотношении. Так, например, в случае альфвеновской циклотронной неустойчивости [6] можно ожидать обратно коренную зависимость частоты от концентрации электронов: $f_A = kc_A$, $c_A = B/\sqrt{\mu_0 \rho_i}$, где k — волновое число, c_A — альфвеновская скорость, μ_0 — магнитная проницаемость вакуума, а ρ_i — массовая плотность ионов основной компоненты плазмы. На рис. 3, *b* приводится зависимость частоты, регистрируемой зондом, от локальной концентрации электронов. Как видно из рисунка, зависимость между частотой и концентрацией отсутствует. Это, однако, не позволяет полностью исключить альфвеновскую или быструю магнитозвуковую волну из рассмотрения, так как из условия резонанса между волной и частицей (с учетом циклотронного вращения) следует $\mathbf{v} \cdot \mathbf{k} + l\omega_{ci} - \omega = 0$ [6,16],

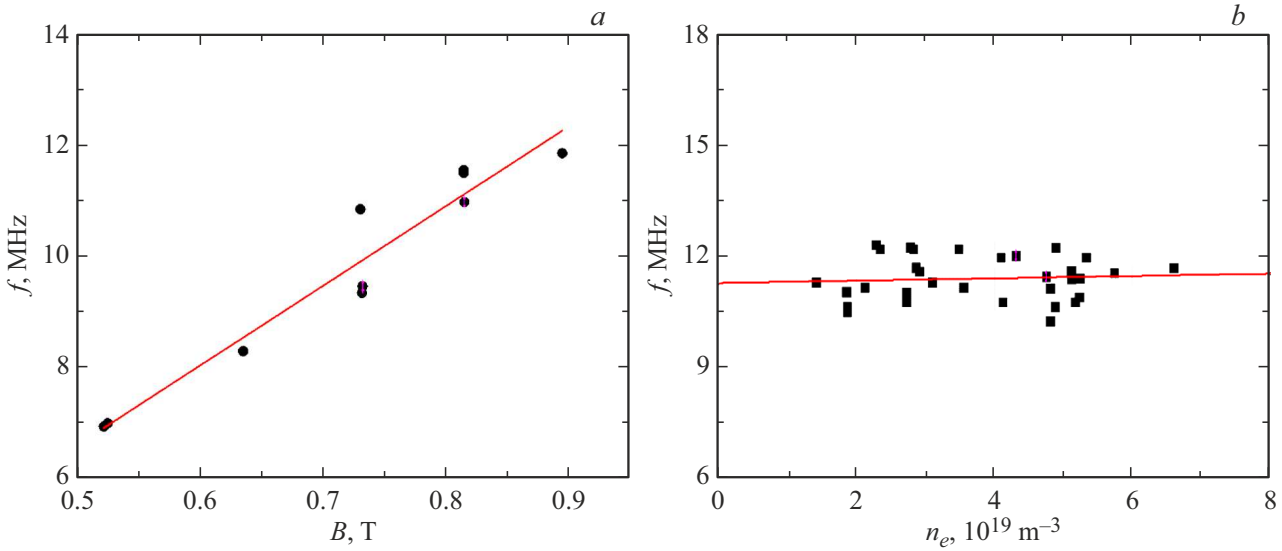

Рис. 3. Зависимость частоты ICE в зоне ее предположительной локализации от величины магнитного поля (a) и локальной концентрации электронов (b).

где v — скорость частицы, k — волновой вектор волны, $l\omega_{ci}$ — циклотронная гармоника с номером l, т. е. в том случае, если член $l\omega_{ci}$ существенно превышает произведение $\mathbf{v} \cdot \mathbf{k}$, зависимость от альфвеновской скорости может быть несущественной на фоне большого вклада циклотронного вращения.

Помимо этого оказалось возможным выполнение условия альфвеновского резонанса. В условиях эксперимента на токамаке Глобус-М2 скорость частиц пучка была сопоставима с альфвеновской (при $B = 0.85$ T, $n_e = 6 \cdot 10^{19}$ m^{-3}, $E_{\mathrm{NBI}} = 46$ keV): $c_A = 1.6 \cdot 10^6$ m/s, а скорость пучка $v_{beam} = 2 \cdot 10^6$ m/s.

Таким образом, было установлено, что ионно-циклотронные колебания, обнаруженные на токамаке Глобус-М2, имеют следующие характеристики: они локализованы в центре плазменного шнура и имеют соотношение компонент магнитного поля, свойственное компрессионным или магнитозвуковым волнам. Также частота излучения имеет линейную зависимость от величины магнитного поля и не зависит от концентрации электронов. Предположительно источником излучения является резонанс волны с быстрыми частицами.

Центрально-локализованные ICE, наблюдавшиеся во время инжекции атомов высокой энергии, ранее регистрировались на многих установках. В частности, в схожих с токамаком Глобус-М2 условиях они наблюдались на ASDEX-Upgrade [2], Туман-3М [14], DIII-D [17]. На этих установках также фиксировалось отсутствие зависимости частоты ICE от плотности плазмы. ICE с подобными параметрами относят [2] к так называемым „central ICE“, и, несмотря на многочисленные наблюдения, излучение такого типа в настоящее время является наименее изученным.

Благодарности

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

Финансирование работы

Подготовка нагревных (тема 0034-2021-0001) и диагностических систем (0034-2024-0028) токамака осуществлена в рамках выполнения госзадания.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] C. Janicki, Nucl. Fusion, **33** (3), 513 (1993). DOI: 10.1088/0029-5515/33/3/I14
[2] R. D'Inca, *Ion cyclotron emission on ASDEX upgrade*, Ph.D thesis (München, 2014). DOI: 10.5282/edoc.17747
[3] S. Cauffman, R. Majeski, Rev. Sci. Instrum., **66** (1), 817 (1995). DOI: 10.1063/1.1146232
[4] G.A. Cottrell, R.O. Dendy, Phys. Rev. Lett., **60** (1), 33 (1988). DOI: 110.1103/PhysRevLett.60.33
[5] N.N. Gorelenkov, New J. Phys., **18**, 105010 (2016). DOI: 10.1088/1367-2630/18/10/105010
[6] N.N. Gorelenkov, C.Z. Cheng, Nucl. Fusion, **35** (12), 1743 (1995). DOI: 10.1088/0029-5515/35/12/I39
[7] 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** (6), 066047 (2017). DOI: 10.1088/1741-4326/aa69e0

[8] Ю.В. Петров, П.А. Багрянский, И.М. Балаченков, Н.Н. Бахарев, П.Н. Брунков, В.И. Варфоломеев, А.В. Воронин, В.К. Гусев, В.Ю. Горяинов, В.В. Дьяченко, Н.В. Ермаков, Е.Г. Жилин, Н.С. Жильцов, С.В. Иваненко, М.В. Ильясова, А.А. Кавин, Е.О. Киселев, А.Н. Коновалов, С.В. Крикунов, Г.С. Курскиев, А.Д. Мельник, В.Б. Минаев, А.Б. Минеев, И.В. Мирошников, Е.Е. Мухин, А.Н. Новохацкий, А.В. Петров, А.М. Пономаренко, Н.В. Сахаров, О.М. Скрекель, А.Е. Соломахин, В.В. Солоха, А.Ю. Тельнова, Е.Е. Ткаченко, В.А. Токарев, С.Ю. Толстяков, Е.А. Тюхменева, Е.М. Хилькевич, Н.А. Хромов, Ф.В. Чернышев, А.Е. Шевелев, П.Б. Щёголев, К.Д. Шулятьев, А.Ю. Яшин, Физика плазмы, **49** (12), 1249 (2023). DOI: 10.31857/S036729212360084X [Yu.V. Petrov, P.A. Bagryansky, I.M. Balachenkov, N.N. Bakharev, P.N. Brunkov, V.I. Varfolomeev, A.V. Voronin, V.K. Gusev, V.A. Goryainov, V.V. Dyachenko, N.V. Ermakov, E.G. Zhilin, N.S. Zhiltsov, S.V. Ivanenko, M.V. Il'yasova, A.A. Kavin, E.O. Kiselev, A.N. Konovalov, S.V. Krikunov, G.S. Kurskiev, A.D. Melnik, V.B. Minaev, A.B. Mineev, I.V. Miroshnikov, E.E. Mukhin, A.N. Novokhatsky, A.V. Petrov, A.M. Ponomarenko, N.V. Sakharov, O.M. Skrekel, A.E. Solomakhin, V.V. Solokha, A.Yu. Telnova, E.E. Tkachenko, V.A. Tokarev, S.Yu. Tolstyakov, E.A. Tukhmeneva, E.M. Khil'kevich, N.A. Khromov, F.V. Chernyshev, A.E. Shevelev, P.B. Shchegolev, K.D. Shulyat'ev, A.Yu. Yashin, Plasma Phys. Rep., **49** (12), 1459 (2023). DOI: 10.1134/S1063780X23601360].

[9] П.Б. Щеголев, В.Б. Минаев, А.Ю. Тельнова, В.И. Варфоломеев, В.К. Гусев, Л.А. Есипов, Н.С. Жильцов, В.В. Колмогоров, А.А. Кондаков, Г.С. Курскиев, И.В. Мирошников, А.А. Панасенков, А.В. Сорокин, И.А. Шиховцев, Физика плазмы, **49** (12), 1293 (2023). DOI: 10.31857/S0367292123601261 [P.B. Shchegolev, V.B. Minaev, A.Yu. Telnova, V.I. Varfolomeev, V.K. Gusev, L.A. Esipov, N.S. Zhiltsov, V.V. Kolmogorov, A.A. Kondakov, G.S. Kurskiev, I.V. Miroshnikov, A.A. Panasenkov, A.V. Sorokin, I.A. Shikhovtsev, Plasma Phys. Rep., **49** (12), 1501 (2023). DOI: 10.1134/S1063780X23601098].

[10] Н.С. Жильцов, Г.С. Курскиев, В.А. Соловей, В.К. Гусев, А.А. Кавин, Е.О. Киселёв, В.Б. Минаев, Е.Е. Мухин, Ю.В. Петров, Н.В. Сахаров, В.В. Солоха, А.Н. Новохацкий, Е.Е. Ткаченко, С.Ю. Толстяков, Е.А. Тюхменева, Письма в ЖТФ, **49** (16), 13 (2023). DOI: 10.21883/PJTF.2023.16.55961.19625 [N.S. Zhiltsov, G.S. Kurskiev, V.A. Solovey, V.K. Gusev, A.A. Kavin, E.O. Kiselev, V.B. Minaev, E.E. Mukhin, Yu.V. Petrov, N.V. Sakharov, V.V. Solokha, A.N. Novokhatsky, E.E. Tkachenko, S.Yu. Tolstyakov, E.A. Tukhmeneva, Tech. Phys. Lett., **49** (8), 50 (2023). DOI: 10.61011/TPL.2023.08.56688.19625].

[11] K.G. McClements, R. D'Inca, R.O. Dendy, L. Carbajal, S.C. Chapman, J.W.S. Cook, R.W. Harvey, W.W. Heidbrink, S.D. Pinches, Nucl. Fusion, **55** (4), 043013 (2015). DOI: 10.1088/0029-5515/55/4/043013

[12] H.L. Berk, B.N. Breizman, N.V. Petviashvili, Phys. Lett. A, **234** (3), 213 (1997). DOI: 10.1016/S0375-9601(97)00523-9

[13] I.M. Balachenkov, N.N. Bakharev, V.K. Gusev, M.V. Iliasova, E.M. Khilkevich, P.S. Korenev, A.E. Konkov, V.B. Minaev, Yu.V. Mitrizhkin, M.I. Patrov, Yu.V. Petrov, N.V. Sakharov, A.E. Shevelev, O.M. Skrekel, Plasma Sci. Technol., **25** (7), 075102 (2023). DOI: 10.1088/2058-6272/acb875

[14] Л.Г. Аскинази, Г.И. Абдуллина, А.А. Белокуров, М.Д. Блехштейн, Н.А. Жубр, В.А. Корнев, С.В. Крикунов, С.В. Лебедев, Д.В. Разуменко, А.И. Смирнов, А.С. Тукачинский, Письма в ЖТФ, **44** (22), 48 (2018). DOI: 10.21883/PJTF.2018.22.46921.17486 [L.G. Askinazi, G.I. Abdullina, A.A. Belokurov, M.D. Blekhshtein, N.A. Zhubr, V.A. Kornev, S.V. Krikunov, S.V. Lebedev, D.V. Razumenko, A.I. Smirnov, A.S. Tukachinsky, Tech. Phys. Lett., **44** (11), 1020 (2018). DOI: 10.1134/S1063785018110184].

[15] E.D. Fredrickson, N.N. Gorelenkov, R.E. Bell, A. Diallo, B.P. LeBlanc, J. Lestz, M. Podestà and the NSTX team, Nucl. Fusion, **61** (8), 086007 (2021). DOI: 10.1088/1741-4326/ac0164

[16] W.W. Heidbrink, Phys. Plasmas, **15** (5), 055501 (2008). DOI: 10.1063/1.2838239

[17] K.E. Thome, D.C. Pace, R.I. Pinsker, M.A. Van Zeeland, W.W. Heidbrink, M.E. Austin, Nucl. Fusion, **59** (8), 086011 (2019). DOI: 10.1088/0029-5515/33/3/I14