

04.2

## Первое применение диагностики плазмы пучком тяжелых ионов для измерения потенциала плазмы при ко-инжекции высокоэнергичных нейтральных атомов в токамак ТУМАН-3М

© А.А. Белокуров, Г.И. Абдуллина, Л.Г. Аскинази, Н.А. Жубр, В.А. Корнев, С.В. Лебедев,  
Д.В. Разуменко, А.И. Смирнов, А.С. Тукачинский, Д.А. Шергин

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

Поступило в Редакцию 29 сентября 2022 г.

В окончательной редакции 26 октября 2022 г.

Принято к публикации 27 октября 2022 г.

Комплекс диагностики плазмы пучком тяжелых ионов (ДПТИ) на токамаке ТУМАН-3М был усовершенствован таким образом, чтобы сделать возможными измерения в режиме с ко-инжекцией высокоэнергичных нейтральных атомов (сонаправленно с током плазмы). С помощью ДПТИ проведены измерения потенциала плазмы в центральной области шнура. Эволюция потенциала в разряде с иницированием перехода в режим улучшенного удержания соответствует представлениям о генерации радиального электрического поля отрицательного знака при формировании транспортного барьера.

**Ключевые слова:** физика плазмы, токамак, потенциал плазмы, диагностика на основе пучка тяжелых ионов, нейтральная инжекция, H-мода.

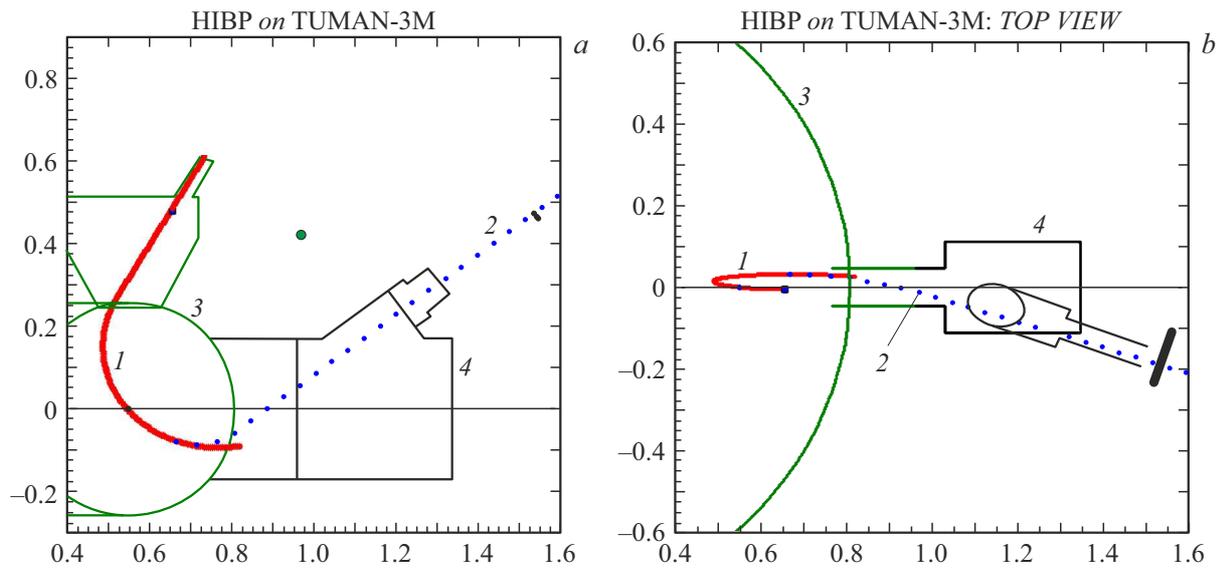
DOI: 10.21883/PJTF.2022.24.54022.19380

Применение инжекции высокоэнергичных нейтральных атомов является эффективным методом нагрева плазмы, генерации вращения, а также доставки топлива в центральную область плазмы. В зависимости от направления вектора скорости инжектируемых атомов по отношению к направлению тороидального магнитного поля в токамаке различают тангенциальную или поперечную инжекцию. При этом тангенциальная инжекция возможна в двух вариантах: когда направление влета пучка в плазму сонаправленно (ко-инжекция) или противоположно (контр-инжекция) с током плазмы. Дополнительное тороидальное вращение плазмы, создаваемое быстрыми ионами в плазме, а также другие процессы, такие как потери быстрых ионов, могут приводить к сильной локальной эволюции полоидального вращения и радиального электрического поля [1,2]. Режимы с контр-инжекцией характеризуются худшим удержанием быстрых ионов, однако в них за счет потерь быстрых ионов может генерироваться отрицательное радиальное электрическое поле  $E_r$ , что способствует иницированию LH-перехода. Подробно эксперименты на токамаке ТУМАН-3М с контр-инжекцией были описаны в [3]. Ко-инжекция характеризуется лучшим удержанием быстрых ионов. При этом, однако, возмущение радиального электрического поля, вызванное инжекцией, складывается как минимум из двух факторов: генерации отрицательного  $E_r$  на периферии за счет потерь быстрых ионов и положительного  $E_r$  в центральной области за счет вращения плазмы в результате передачи импульса от инжектируемого пучка. Совместное воздействие данных факторов может приводить к генерации сильно неоднородного распределения поля  $E_r$  по сечению плаз-

мы. Диагностика плазмы пучком тяжелых ионов (ДПТИ) позволяет получить важную информацию о величине и динамике радиального электрического поля в этом режиме, получение которой другими способами может быть затруднено или невозможно.

В основе ДПТИ лежит инжекция в плазму пучка ускоренных ионов в полоидальной плоскости [4]. В результате столкновений ионов зондирующего пучка (первичных ионов) с электронами плазмы образуются ионы с большим зарядом (вторичные ионы), траектории которых отклоняются от траекторий первичных ионов в точке ионизации, поскольку имеют вдвое меньший радиус кривизны в магнитном поле. В детектор, расположенный вне плазмы, приходят вторичные ионы, образовавшиеся в некоторой локализованной в пространстве области вдоль траектории первичных частиц. По разнице энергий первичных и вторичных ионов можно определить потенциал плазмы в точке вторичной ионизации.

С точки зрения понимания физических механизмов нагрева и удержания плазмы при нейтральной инжекции и связи этих процессов с генерацией радиального электрического поля экспериментальное исследование воздействия ко-инжекции на пространственно-временную эволюцию потенциала плазмы с помощью ДПТИ представляет несомненный теоретический и практический интерес. Проведение таких экспериментов потребовало разработки новой конструкции выходного патрубка токамака, через который вторичные ионы при ДПТИ поступают в анализатор энергии. Из-за того что инжектор нейтральных атомов на токамаке ТУМАН-3М зафиксирован, переход от контр-инжекции к ко-инжекции осуществляется за счет обращения направления тока



**Рис. 1.** Расчетные траектории первичных ионов калия  $K^+$  (1) и вторичных ионов  $K^{2+}$  (2) в токамаке ТУМАН-3М в характерном разряде с ко-инжекцией. *a* — полоидальное сечение, *b* — вид сверху. Линией 3 показаны габариты камеры токамака, линией 4 — габариты входного патрубка и положение щелей анализатора.

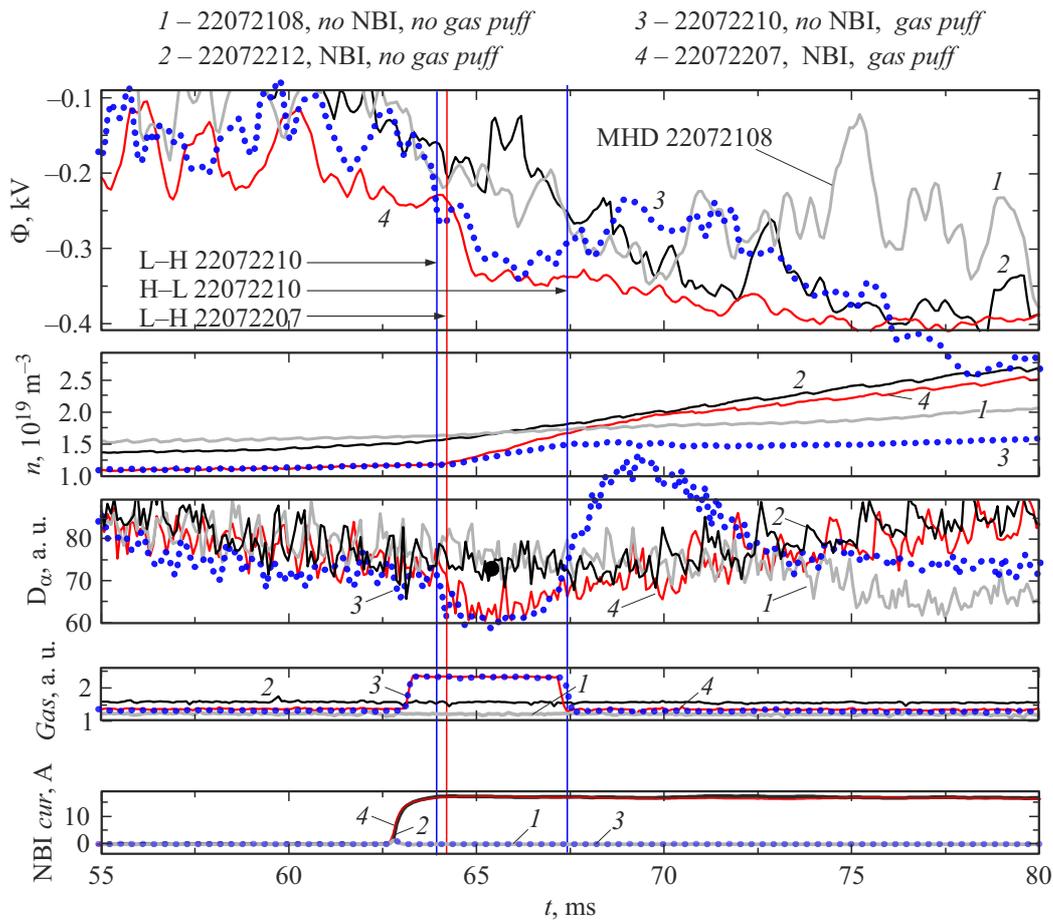
плазмы. Исходная конфигурация ДПТИ на токамаке ТУМАН-3М была рассчитана на использование в режиме контр-инжекции, в связи с чем выходной патрубок имел наклон по отношению к полоидальной плоскости в сторону направления тока плазмы. При обращении направления тока плазмы вторичные ионы отклоняются полоидальным полем в противоположную сторону, и зарегистрировать их с помощью существовавшего патрубка оказывается невозможным.

Для определения оптимальной конфигурации выходного патрубка было выполнено численное моделирование траекторий вторичного пучка ДПТИ в эксперименте с инжекцией нейтрального пучка в направлении тока плазмы. Моделирование проводилось путем численного решения уравнений движения первичных и вторичных ионов в реальных магнитных полях токамака ТУМАН-3М. Для учета тороидальной и полоидальной неоднородности реального тороидального магнитного поля, особенно сильной в пространстве между тороидальными катушками на выходе вторичного пучка из камеры токамака, тороидальное магнитное поле вычислялось по закону Био–Савара с учетом геометрии и расположения катушек тороидального поля. Аналогичным способом рассчитывалось и полоидальное поле от катушек управляющего поля. Поле тока плазмы рассчитывалось с использованием модельного параболического распределения плотности тока по сечению шнура. Влиянием электрического поля в плазме на траектории первичного и вторичного пучков в данном расчете пренебрегали в силу его малости: потенциал плазмы является величиной относительно малой (сотни вольт—единицы киловольт) по сравнению с энергией пучка ( $\sim 50\text{--}80\text{ keV}$ ).

При характерном сценарии в токамаке ТУМАН-3М с низкой концентрацией плазмы (тороидальное магнитное поле  $B_T = 0.95\text{ T}$ , ток плазмы  $I_{pl} = 150\text{ kA}$ , ток в управляющих обмотках  $I_{contr} = 105\text{ kA}$ ) пучок вторичных ионов калия с энергией  $70\text{ keV}$  из середины плазменного шнура попадает в анализатор; расчетные траектории пучков показаны на рис. 1. Изменяя энергию и угол влета первичного пучка, можно добиться сигнала как из центра плазмы ( $r/a = 0.3$ ), так и с периферии (примерно до  $r/a = 0.8$ ).

В режиме с ко-инжекцией были проведены измерения эволюции потенциала плазмы. Для анализа были отобраны сценарии, в которых возможно оценить вклад различных факторов, влияющих на потенциал плазмы. Во-первых, это разряды с ко-инжекцией нейтрального пучка, в которых можно предположить наблюдение как положительного вклада в потенциал за счет генерации положительного радиального электрического поля при тороидальном вращении плазмы, так и отрицательного за счет потери быстрых ионов с первой орбиты. Во-вторых, это разряды с импульсом газонапуска. В таких разрядах, как показывают эксперименты на токамаке ТУМАН-3М [5], возможно инициирование LH-перехода и, как следствие, возможна генерация отрицательного радиального электрического поля при формировании транспортного барьера.

Характерная величина тороидального магнитного поля в рассматриваемых разрядах  $B_T < 0.95\text{ T}$ , тока плазмы  $I_{pl} < 160\text{ kA}$ , среднехордовой концентрации плазмы в L-моду  $n = (1\text{--}1.5) \cdot 10^{19}\text{ m}^{-3}$ , в H-моду  $n < 2.5 \cdot 10^{19}\text{ m}^{-3}$ . В экспериментах при такой концентрации наблюдался переход в H-моду, инициированный импульсом газонапуска и ко-инжекцией нейтрального



**Рис. 2.** Эволюция параметров плазмы в различных разрядах: 1 — омическом (№ 22072108), 2 — с ко-инжекцией (№ 22072212), 3 — с дополнительным газонапуском (№ 22072210), 4 — с совместными ко-инжекцией и дополнительным импульсом газонапуска (№ 22072207). Сверху вниз: потенциал плазмы, среднесортовая концентрация, свечение линии  $D_\alpha$ , напряжение на клапане газонапуска, ток эмиссионного электрода при инъекции нейтрального пучка (NBI). Заметная эволюция потенциала со спадом примерно на 150 V, соответствующая LH-переходу, наблюдается при совместных ко-инжекции и дополнительном импульсе газонапуска (линии 4). В сценарии с дополнительным импульсом газонапуска наблюдаются последовательные LH- и HL-переходы (линии 3).

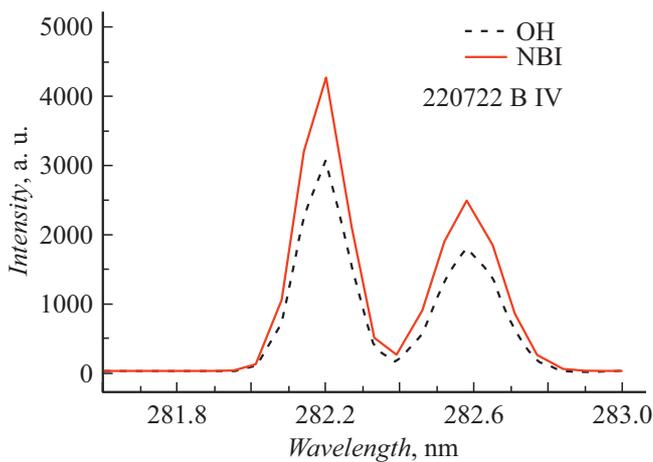
пучка. При этом, чтобы обеспечить отсутствие спонтанного LH-перехода в фазе омического нагрева (перед инъекцией), необходимо было поддерживать достаточно низкую концентрацию фоновой плазмы в L-моду.

На рис. 2 приведено сравнение четырех характерных сценариев. Первый — омический разряд без дополнительного газонапуска, служащий реперным сценарием. Второй — разряд с нейтральной инъекцией без дополнительного газонапуска. Третий — разряд с дополнительным газонапуском без нейтральной инъекции. Четвертый — разряд с нейтральной инъекцией и одновременным дополнительным газонапуском. Точка вторичной ионизации, т. е. точка измерения потенциала, соответствует  $r/a = 0.6$ .

При нейтральной инъекции происходит рост концентрации плазмы, однако эволюция потенциала плазмы достаточно точно повторяет эволюцию потенциала плазмы в омическом разряде; ни один из ожидаемых

эффектов, которые нейтральная инъекция может оказать на потенциал плазмы, не наблюдается. Отсутствие изменений в удержании частиц также подтверждается тем, что интенсивность свечения линии  $D_\alpha$  на стенке, пропорциональная потоку частиц и энергии из плазмы на материальные поверхности, не претерпевает уменьшения, характерного для перехода в H-моду. Отсутствие эволюции потенциала тем не менее не может быть связано с чувствительностью детекторов, так как вспышка МГД-активности (магнитогидродинамической активности), разыгравшаяся в разряде 22072108 (рис. 2), приводит к положительному подбросу потенциала в согласии с [6].

При этом в разряде, где нейтральной инъекции сопутствует дополнительный газонапуск, видны признаки перехода в H-моду: через 1.5 ms после начала инъекции и газонапуска потенциал плазмы скачкообразно падает примерно на 150 V, и это явление сопровождается од-



**Рис. 3.** Спектры свечения линии В IV в омическом разряде (штриховая линия) и разряде с ко-инжекцией (сплошная линия). Аппроксимация гауссовой функцией показывает, что смещение центра и уширение контуров в этих сценариях совпадают.

новременным ростом концентрации и спадом свечения линии  $D_{\alpha}$ , что характерно также для наблюдаемых в токамаке ТУМАН-3М омических ЛН-переходов.

В разряде с дополнительным импульсом газонапуска без нейтральной инжекции также наблюдается ЛН-переход с характерными признаками: ростом концентрации, спадом свечения линии  $D_{\alpha}$  и спадом потенциала плазмы примерно на 100 В. Необходимо отметить, что в рассматриваемом сценарии с низкой концентрацией плазмы после выключения дополнительного газонапуска происходит обратный переход в режим обычного удержания (НЛ-переход, см. рис. 2) в отличие от сценариев с большей концентрацией, в которых дополнительный газонапуск обычно инициирует переход в самоподдерживающуюся Н-моду. Такое наблюдение может быть объяснено в рамках подхода, основанного на анализе уравнений переноса с нелинейным коэффициентом диффузии, учитывающего подавление турбулентности неоднородным радиальным электрическим полем и влияние источника частиц на возможность существования Н-моды. Подробно данный подход изложен в [7–9]. В [8] показаны результаты моделирования эволюции профиля концентрации плазмы при постепенном увеличении источника, в частности плавный (в течение нескольких миллисекунд) ЛН-переход при достижении источником частиц уровня, определяющего существование только одного устойчивого решения уравнения диффузии, соответствующего Н-моду. Данный результат согласуется с экспериментальными наблюдениями: инициирование перехода в Н-моду в сценарии с импульсным газонапуском обусловлено увеличением источника частиц. Когда дополнительный источник частиц исчезает, условие существования Н-моды перестает выполняться, вследствие чего происходит обратный переход.

Таким образом, можно заключить, что инициирование ЛН-перехода в рассматриваемых в настоящей работе сценариях происходит благодаря дополнительному газонапуску; влияние нейтральной инжекции на удержание частиц при данных параметрах плазмы и инжекции сводится к дополнительному источнику частиц, обеспечивающему существование Н-моды в разрядах с совместным газонапуском и нейтральной инжекцией.

Поскольку при инжекции не наблюдается положительный прирост потенциала, можно заключить, что эффект, связанный с генерацией отрицательного  $E_r$  при инициировании ЛН-перехода газонапуском, оказывается существенно более выраженным по сравнению с генерацией положительного  $E_r$  при внесении дополнительного тороидального вращения. Можно сделать оценку для величины потенциала, наведенного тороидальным вращением на середине малого радиуса. Добавка к скорости вращения в 1 км/с, согласно оценке  $v_{\phi} = \frac{E_r B_{\theta}}{B_{\phi}^2}$  для середины малого радиуса ( $B_{\phi} = 0.8$  Т,  $B_{\theta} = 0.1$  Т), соответствует радиальному электрическому полю 6.4 кВ/м или при оценке  $E_r = \Phi/(a/2)$  потенциалу 700 В. Из измерений видно, что положительного возмущения потенциала такой величины под воздействием импульса нейтральной инжекции в описываемом эксперименте не наблюдается. Таким образом, можно заключить, что при ко-инжекции в разрядах с низкой концентрацией инициированное инжекцией положительное радиальное электрическое поле, а значит, и скорость тороидального вращения в направлении по току малы. Причиной такого незначительного вклада нейтральной инжекции во вращение плазмы может быть то, что при столь низкой концентрации плазмы — порядка  $(1-1.5) \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$  — передача импульса и энергии от пучка плазме малы, а потери, в том числе напролет, велики [10]. Это также может быть причиной отсутствия генерации отрицательного радиального электрического поля из-за потерь быстрых ионов с первой орбиты.

Отсутствие заметного тороидального вращения подтверждают измерения контура линии В IV ( $\lambda=282.2$  нм), наблюдаемой в тороидальном направлении по току плазмы под углом примерно  $20^{\circ}$  к экваториальной плоскости. Результаты наблюдения спектрометрической диагностики показывают, что в разрядах с нейтральной инжекцией по сравнению с аналогичными омическими разрядами не наблюдается ни сдвига линий, ни их уширения (рис. 3). Это свидетельствует о малой эффективности передачи энергии и импульса нейтральной инжекции ионам плазмы. Причиной этого может быть слишком низкая плотность плазмы в данных экспериментах, в результате чего значительная часть атомарного пучка пролетает плазму насквозь без ионизации.

Добиться более эффективной передачи энергии и импульса нейтральной инжекции в режиме ко-инжекции представляется возможным в первую очередь увеличением плотности и электронной температуры плазмы для увеличения доли энергии, передаваемой ионам, а также

увеличением тока и энергии инжектируемых атомов. Данное предположение основывается в том числе на результатах, опубликованных в [11], где показано влияние ко-инжекции на генерацию полоидального вращения плазмы в разрядах с большей концентрацией.

### Финансирование работы

Обеспечение функционирования и работы стандартных диагностик токамака ТУМАН-3М осуществляется при поддержке государственного контракта ФТИ им. А.Ф. Иоффе 0040-2019-0023. Оптические измерения при нейтральной инжекции выполнены при поддержке государственного контракта ФТИ им. А.Ф. Иоффе 0034-2021-0001. Исследования с помощью ДПТИ на токамаке ТУМАН-3М обеспечиваются Российским научным фондом (проект 22-12-00062).

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] K. Ida, *Plasma Phys. Control. Fusion*, **40**, 1429 (1998). DOI: 10.1088/0741-3335/40/8/002
- [2] G.D. Conway, J. Schirmer, S. Kluge, W. Suttrop, E. Holzhauser and the ASDEX Upgrade Team, *Plasma Phys. Control. Fusion*, **46**, 951 (2004). DOI: 10.1088/0741-3335/46/6/003
- [3] S.V. Lebedev, L.G. Askinazi, F.V. Chernyshev, M.A. Irzak, V.A. Kornev, S.V. Krikunov, A.D. Melnik, D.V. Razumenko, V.V. Rozhdestvensky, A.I. Smirnov, *Nucl. Fusion*, **49**, 085029 (2009). DOI: 10.1088/0029-5515/49/8/085029
- [4] T.P. Crowley, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **22**, 291 (1994). DOI: 10.1109/27.310636
- [5] S.V. Lebedev, M.V. Andrejko, L.G. Askinazi, V.E. Golant, V.A. Kornev, S.V. Krikunov, L.S. Levin, B.M. Lipin, G.T. Razdobarin, V.A. Rozhansky, V.V. Rozhdestvensky, A.I. Smirnov, M. Tendler, A.S. Tukachinsky, S.P. Yaroshevich, *Plasma Phys. Control. Fusion*, **38**, 1103 (1996). DOI: 10.1088/0741-3335/38/8/003
- [6] L.G. Askinazi, V.E. Golant, V.A. Kornev, S.V. Lebedev, A.S. Tukachinsky, M.I. Vildjunas, N.A. Zhubr, *Plasma Phys. Control. Fusion*, **48**, A85 (2006). DOI: 10.1088/0741-3335/48/5A/S07
- [7] M.A. Malkov, P.H. Diamond, *Phys. Plasmas*, **15**, 122301 (2008). DOI: 10.1063/1.3028305
- [8] A.A. Belokurov, L.G. Askinazi, L. Chôné, E.Z. Gusakov, T.P. Kiviniemi, V.A. Kornev, T. Korpilo, S.V. Krikunov, S.V. Lebedev, S. Leerink, P. Niskala, R. Rochford, A.I. Smirnov, A.S. Tukachinsky, N.A. Zhubr, *Nucl. Fusion*, **58**, 112007 (2018). DOI: 10.1088/1741-4326/aac4e9
- [9] A.A. Belokurov, G.I. Abdullina, L.G. Askinazi, V.V. Bulanin, L. Chôné, A.D. Gurchenko, E.Z. Gusakov, T.P. Kiviniemi, V.A. Kornev, S.V. Krikunov, D.V. Kouprienko, S.I. Lashkul, S.V. Lebedev, S. Leerink, P. Niskala, A.V. Petrov, D.V. Razumenko, A.S. Tukachinsky, A.Yu. Yashin, N.A. Zhubr, *Phys. Scripta*, **95**, 115604 (2020). DOI: 10.1088/1402-4896/abbfcc
- [10] L.G. Askinazi, A.G. Barsukov, V.E. Golant, V.K. Gusev, V.V. Kusnetsov, S.V. Lebedev, V.M. Leonov, A.V. Lupin, V.B. Minaev, A.A. Panasenkov, A.R. Polevoi, G.N. Tilinin, A.S. Tukachinsky, V.A. Yagnov, *Plasma Dev. Oper.*, **11**, 211 (2003). DOI: 10.1080/1051999031000155524
- [11] A.Yu. Yashin, A.A. Belokurov, L.G. Askinazi, A.V. Petrov, A.M. Ponomarenko and the TUMAN-3M Team, *Atoms*, **10**, 106 (2022). DOI: 10.3390/atoms10040106