

04.2

## Моделирование диагностики FIDA с помощью кода FIDASIM для исследования функции распределения быстрых ионов при нейтральной инжекции на токамаке ТУМАН-3М

© Л.К. Шувалова, Г.И. Абдуллина, Л.Г. Аскинази, А.А. Белокуров, Н.А. Жубр,  
Е.О. Киселев, В.А. Корнев, С.В. Лебедев, Д.В. Разуменко,  
А.И. Смирнов, А.С. Тукачинский

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

Поступило в Редакцию 14 декабря 2023 г.

В окончательной редакции 28 февраля 2024 г.

Принято к публикации 1 марта 2024 г.

Для интерпретации измеренных спектров, полученных при проведении экспериментов с использованием диагностики излучения быстрых атомов перезарядки (FIDA — Fast-Ion D-Alpha), и выделения на них полезного сигнала FIDA создан пакет программ для формирования полного набора входных параметров моделирования в коде FIDASIM с использованием кодов ASTRA/NUBEAM. По результатам моделирования проведено качественное сравнение синтетического и экспериментального спектров, показавшее их сходство в коротковолновой части спектра сигнала, что подтверждает наличие излучения FIDA в экспериментальном спектре.

**Ключевые слова:** быстрые ионы, диагностика атомов перезарядки FIDA, нейтральная инжекция.

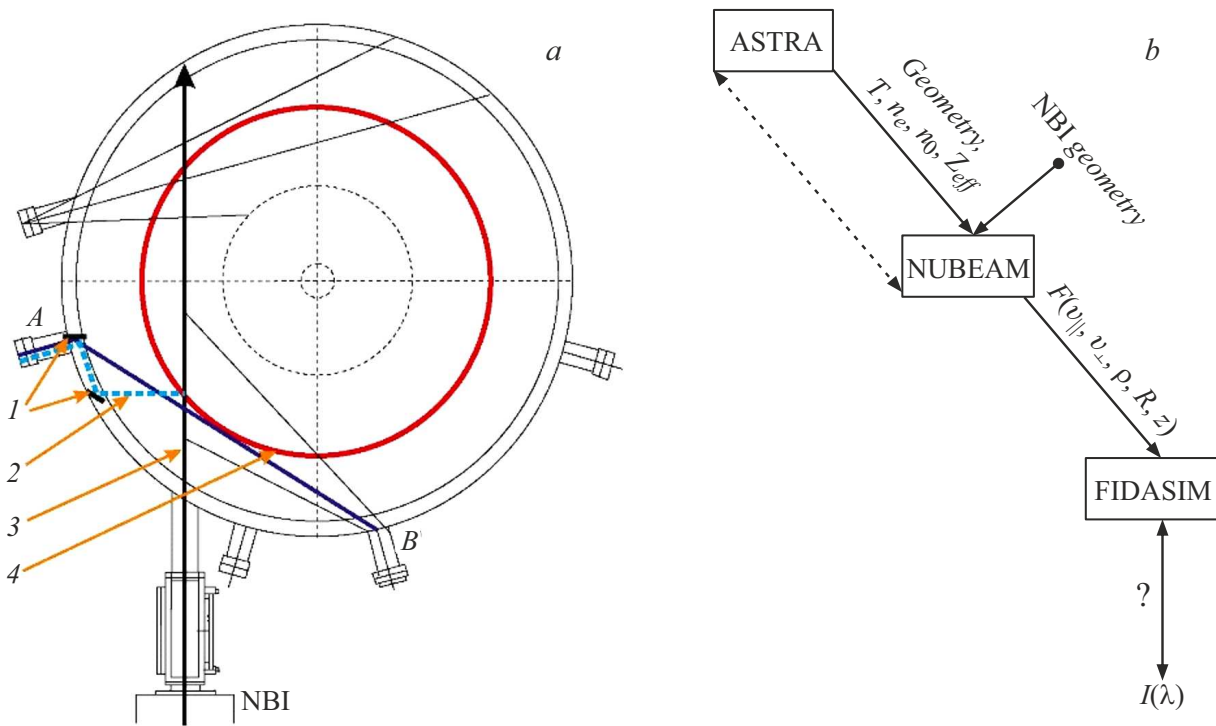
DOI: 10.61011/PJTF.2024.11.57904.19843

Ионы изотопов водорода высокой энергии присутствуют в большинстве современных экспериментов по управляемому термоядерному синтезу. В плазме токамака быстрые ионы (БИ) могут образовываться в результате реакций синтеза и нагрева плазмы инжекцией пучка нейтральных атомов (NBI) или с помощью высокочастотного нагрева. Важно иметь информацию о поведении БИ, поскольку их хорошее удержание необходимо для достижения высоких температур основной плазмы и, следовательно, достижения термоядерного синтеза. С другой стороны, БИ могут вызывать раскачку различных неустойчивостей, приводя к ухудшению удержания БИ.

Чтобы понимать поведение БИ, необходимо исследовать их функцию распределения. Для ее изучения используются различные диагностики, в число которых входит диагностика FIDA (Fast-Ion D-Alpha) [1]. FIDA — это спектроскопическая диагностика, основанная на реакции перезарядки БИ дейтерия с атомами инжектируемого пучка. БИ захватывают электрон в возбужденное квантовое состояние, становясь при этом нейтральными. Получившаяся нейтральная частица имеет скорость БИ и впоследствии испускает линейчатое излучение. Излучение FIDA происходит из области пересечения атомарного пучка, области локализации БИ и диаграммы направленности оптического прибора, что обеспечивает хорошую локальность измерения. В рассматриваемом диапазоне длин волн присутствуют также и другие источники излучения, регистрируемые диагностикой: излучение атомов нагретого пучка (результат возбуждения их электронным ударом), так на-

зываемое гало (следствие перезарядки тепловых ионов плазмы на инжектируемых атомах), pFIDA (результат реакции перезарядки БИ с фоновыми нейтральными частицами), тормозное излучение, несдвинутая линия излучения  $H_\alpha$  ( $D_\alpha$ ) (возбуждение электронным ударом холодных нейтральных частиц, поступающих со стенки и из системы подачи рабочего газа), линии примесей, что затрудняет выделение собственно сигнала FIDA из измеренного спектра. В настоящий момент диагностика активно используется на множестве установок по всему миру: DIII-D, ASDEX Upgrade, TCV, MAST и др. [2,3], в том числе и на токамаке ТУМАН-3М.

На токамаке ТУМАН-3М были проведены эксперименты по измерению излучения атомов перезарядки в различных вариантах геометрии [4]. Диагностика FIDA на токамаке ТУМАН-3М в настоящее время включает в себя только одну перестраиваемую линию наблюдения. Инжекция пучка нейтральных атомов ведется по току плазмы тангенциально с прицельным параметром  $b = 42$  см (рис. 1, *a*). В ходе предварительных экспериментов в качестве оптимального варианта было принято расположение линии наблюдения практически перпендикулярно линии инжекции нейтральных частиц, поскольку в такой конфигурации ослаблено влияние доплеровского сдвига излучения возбужденных атомов инжектируемого пучка. Угол между линией наблюдения и вектором скорости пучка БИ составляет примерно  $60^\circ$ . Эксперименты проводились при инжекции водородного пучка с энергией до 22 keV в водородную плазму. Выбор водорода в качестве инжектируемого элемента



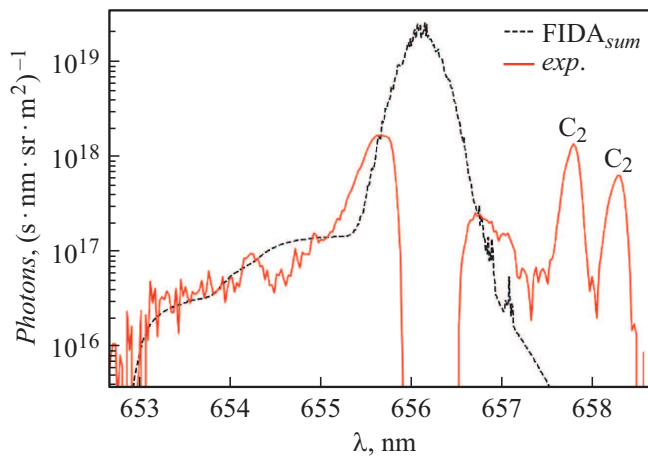
**Рис. 1.** *a* — геометрия измерения диагностики FIDA для токамака ТУМАН-3М. 1 — перископ из двух зеркал, 2 — линия наблюдения, перпендикулярная инъекции (пунктирная линия), 3 — линия инъекции NBI (прицельный параметр — расстояние от центра камеры до линии инъекции), 4 (окружность, выделенная жирной линией) — область локализации наибольшего числа быстрых ионов, рожденных в результате ионизации атомов нагревного пучка. Для эффективной реализации диагностики все три линии должны пересекаться в одной точке. *b* — блок-схема моделирования диагностики FIDA (связь вычислительного кода FIDASIM с кодами ASTRA и NUBEAM).

обусловлен тем, что при той же энергии величина доплеровского сдвига водородных линий в  $\sqrt{2}$  раз больше, чем для дейтериевых, что должно облегчить поиск и интерпретацию сигнала FIDA. Полученный экспериментальный спектр (сплошная линия на рис. 2) в дальнейшем использовался для сравнения с модельным.

Для интерпретации экспериментальных сигналов, получаемых при измерениях диагностикой FIDA, используется численное моделирование ожидаемых спектров с учетом всех эффектов, порождающих излучение в данном диапазоне длин волн. Моделирование проводилось с помощью открытого кода FIDASIM [5], написанного на языке Fortran90 и реализующего метод Монте-Карло. FIDASIM требует создания большого массива входных данных, содержащих пространственное распределение плазменных параметров (электронная и ионная температуры, плотности плазмы и нейтральных частиц, эффективный заряд и пр.), функцию распределения БИ, данные о равновесии в разряде, геометрию и параметры нейтральной инъекции, сведения о линиях наблюдения и др. При работе с FIDASIM необходимо определить источники запрашиваемых входных данных и взаимосвязь между ними. В настоящей работе для этого

использовались коды ASTRA [6] и NUBEAM [7]. Блок-схема получения синтетических спектров диагностики представлена на рис. 1, *b*.

По умолчанию FIDASIM предназначен для работы с выходными файлами кода TRANSP, однако выполнять моделирование разрядов с его помощью не представляется возможным для токамака ТУМАН-3М в силу отсутствия доступа и сложности использования. Транспортный код ASTRA используется для моделирования профилей плазмы, код NUBEAM — для моделирования методом Монте-Карло поведения БИ, возникающих в результате нейтральной инъекции. В коде ASTRA рассчитываются плазменные профили (температура  $T$ , электронная  $n_e$  и нейтральная  $n_0$  плотности, эффективный заряд  $Z_{eff}$ ), которые в дальнейшем передаются в код NUBEAM. Кроме того, в код NUBEAM передается модель атомарного инжектируемого пучка (энергия и мощность инъекции, доли тока для компонент с полной/половинной энергией, значение прицельного параметра и др.) и форма магнитных поверхностей. Выходные параметры двух кодов (ASTRA и NUBEAM), в частности функция распределения  $F$ , зависящая от координат  $z$  (по вертикали),  $R$  (по большому радиусу),  $\rho$  (по радиусу магнитной поверхно-



**Рис. 2.** Сравнение спектров, полученных в эксперименте (разряд 22071914) (сплошная линия) и с помощью моделирования FIDASIM (штриховая линия). Типичные параметры плазмы в эксперименте:  $B = 0.7\text{--}1\text{ T}$ ,  $I_p = 130\text{--}150\text{ kA}$ ,  $n = (0.7\text{--}3.5) \cdot 10^{19}\text{ m}^{-3}$ ,  $E_{\text{NBI}} = 14\text{--}30\text{ keV}$ ,  $t_{\text{NBI}} = 20\text{--}60\text{ ms}$ . Излучение несмещенной линии  $H_\alpha$  на границе очень яркое. Для предотвращения насыщения матрицы на ее длине волны применяется специальный фильтр-шаблон для подавления излучения, результатом применения которого является подавление центрального пика экспериментального спектра.

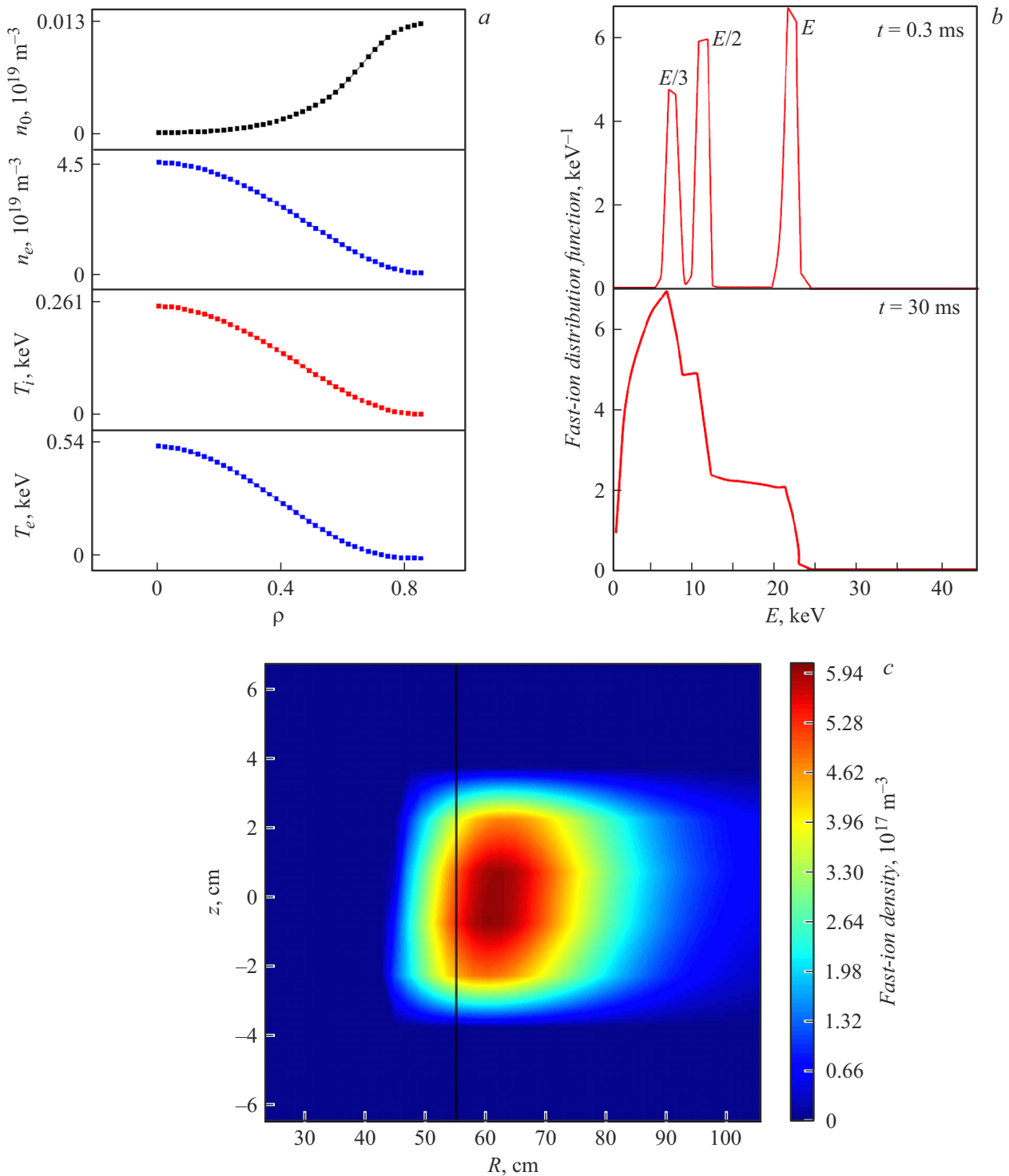
сти), параллельной  $v_{\parallel}$  и поперечной  $v_{\perp}$  составляющих скорости быстрой частицы, а также геометрия спектральной диагностики связываются между собой, что позволяет провести расчет в коде FIDASIM, получив синтетический спектр FIDA. Результат работы кода сравнивается с экспериментальным для определения точности рассчитанной ранее функции распределения БИ. В настоящей работе составлена процедура базового алгоритма на основе прямой схемы: ASTRA–NUBEAM–FIDASIM.

После установления взаимосвязи между основными шагами расчета было проведено моделирование типичного разряда в транспортном коде ASTRA. Известные параметры эксперимента (геометрия камеры, ток по плазме, тороидальное магнитное поле и др.) были занесены в транспортный код ASTRA, в нем же были вычислены профили требуемых величин: плотность нейтральной компоненты, электронная плотность, ионная и электронная температуры (рис. 3, *a*). Эффективный заряд определялся исходя из проводимости плазмы, считался неизменным по радиусу и равным  $Z_{\text{eff}} = 1.6$ . Далее с помощью кода NUBEAM, предназначенного для моделирования инжекции пучка нейтральных атомов в плазму токамака, была рассчитана тестовая функция распределения БИ в зависимости от энергии, питч-угла и координат частицы. Пример смоделированной функции распределения БИ для токамака ТУМАН-3М для двух моментов времени (0.3 и 30 ms от начала инжекции) приведен на рис. 3, *b*. Видно, что соответствующие начальному моменту времени три пика

полной, половинной и третьей части энергии с течением времени преобразуются в три ступени. В процессе замедления БИ доля энергий меньше начальной растет, в результате чего спад от каждого пика накладывается на предыдущие. С другой стороны, наличие именно „ступенек“ свидетельствует об относительно хорошем удержании БИ: в противном случае, когда характерное время удержания меньше времени термализации, вместо „ступенек“ имели бы место относительно узкие пики [8,9].

Для запуска моделирования FIDASIM была модернизирована утилита, объединяющая все созданные в процессе работы данные в итоговые файлы. Они содержат данные о магнитной конфигурации, интерполированные на нее данные о температуре и концентрации плазмы, магнитных полях и функции распределения БИ, геометрию инжектируемого пучка нейтральных частиц и параметры настроек моделирования, фракционный состав пучка со следующим соотношением:  $E$  — 44%,  $E/2$  — 32%,  $E/3$  — 24%. Этот энергетический спектр близок к измеряемому по доплеровскому сдвигу свечения линии  $H_\alpha$  ( $D_\alpha$ ) при инжекции пучка в камеру токамака, наполненную нейтральным рабочим газом (без плазменного разряда), при наблюдении „в хвост“ пучку с помощью спектрометра AvaSpec-2048. Дополнительно была смоделирована геометрия оптических спектральных измерений FIDA, что потребовало точного расчета положения и направления линии наблюдения диагностики, и проведен расчет в коде FIDASIM.

На рис. 2 (штриховая линия) представлен расчетный спектр, полученный с помощью кода FIDASIM — суммарный регистрируемый сигнал источников в данном волновом диапазоне пучка (активный сигнал FIDA, пассивный сигнал FIDA, тормозное излучение, излучение атомов пучка, излучение прямой перезарядки и гало, излучение холодных нейтральных атомов). Пассивный сигнал FIDA в моделировании оказался больше активного. Это означает, что свет излучается не локально из области вдоль пучка, а из всего объема наблюдения. Преобладание пассивного сигнала над активным может быть связано с завышенным значением нейтральной плотности в расчете. Кроме того, в эксперименте на высокую амплитуду пассивного сигнала FIDA влияет направление линии наблюдения диагностики на клапан напуска газа. Было проведено первое сравнение (рис. 2) модельного спектра (штриховая линия) с экспериментальным (сплошная линия). На коротковолновом крыле излучения FIDA заметно хорошее согласие экспериментального и рассчитанного сигналов, что может свидетельствовать о наличии излучения быстрых атомов перезарядки на экспериментальном спектре. Центральные провалы на экспериментальном спектре соответствуют излучению холодных нейтральных атомов, подавленному с помощью фильтр-шаблона. Справа от него располагаются две линии углерода, текущая версия FIDASIM не позволяет рассчитать излучение примеси. Следует отметить, что FIDASIM рассчитывает не



**Рис. 3.** Входные параметры диагностики, необходимые для вычисления спектра. *a* — профили плазменных параметров, рассчитанные в коде ASTRA (сверху вниз: плотность фоновых нейтральных частиц, электронная плотность, ионная температура, электронная температура). *b* — типовая функция распределения БИ, рассчитанная в коде NUBEAM для моментов времени 0.3 и 30 ms. *c* — оценка плотности БИ, рассчитанная в коде FIDASIM. По оси абсцисс отложен большой радиус, по оси ординат — вертикальное смещение рождающихся БИ. Цвет отображает плотность БИ. Темная вертикальная линия соответствует геометрическому центру камеры. Максимальная локализация быстрых частиц соответствует области  $R \approx 59 \text{ cm}$ . Цветной вариант рисунка представлен в электронной версии статьи.

только полезный сигнал FIDA, но и уровень тормозного излучения. Однако уровень шумов (постоянное смещение) матрицы CCD-камеры в проводимых экспериментах превышал уровень сигнала от тормозного излучения, что делало невозможным количественное сравнение расчетного и экспериментального спектров.

Для качественной проверки расчетов функции распределения БИ с помощью кода FIDASIM были проведены дополнительные расчеты нейтронного выхода для разряда с инжекцией дейтерия в дейтериевую плазму и плотности БИ по полученной функции распределения. Результаты расчетов показали удовлетворительное согласие с экспериментально измеренными потоками нейтронов и потоками быстрых нейтральных атомов, измеряемых анализаторами атомов перезарядки ( $1.2 \cdot 10^{11}$  нейтронов) [10,11]. Пример вычисленной плотности БИ приведен на рис. 3, с.

Как известно, на удержание БИ могут оказывать существенное влияние различные процессы, такие как перезарядка на фоновых нейтральных атомах, неустойчивости, орбитальные потери в результате столкновений и др. В настоящей работе рассмотрен один из возможных механизмов потерь — влияние радиального электрического поля  $E_r$ , генерируемого на периферии шнура при L–H-переходе или в центральной части плазмы при инжекционном нагреве [12]. Однако на токамаке ТУМАН-3М не обнаружено существенного влияния L–H-перехода и возникающего при этом поля  $E_r$  на спектр и интенсивность сигнала FIDA, возможно потому, что БИ локализованы в основном вблизи центра плазмы. Для проверки этого соображения было проведено моделирование траекторий БИ при наличии и отсутствии периферийного радиального электрического поля  $E_r = -3 \text{ kV/m}$  (типичного для H-моды в токамаке ТУМАН-3М). Как и ожидалось, включение такого поля приводит к некоторому искажению лишь траекторий сильно запертых ионов, проходящих вблизи границы плазмы. Такие ионы не должны оказывать существенного влияния на сигнал FIDA.

В целом можно заключить, что созданный программный комплекс качественно удовлетворительно описывает наблюдаемые на токамаке ТУМАН-3М сигналы FIDA. Для количественного сравнения в будущем потребуется увеличить чувствительность регистрирующей аппаратуры с тем, чтобы сигнал тормозного излучения из плазмы превышал уровень шумов матрицы CCD-камеры. Для этого будет совершен переход на матрицу с лучшим отношением сигнал/шум (например, охлаждаемую).

### Финансирование работы

Обеспечение функционирования токамака ТУМАН-3М и работы стандартных диагностик осуществлялось при поддержке государственного

контракта ФТИ им. А.Ф. Иоффе 0040-2019-0023. Создание комплекса диагностики FIDA и моделирование ее работы на токамаке ТУМАН-3М осуществлено при поддержке государственного контракта ФТИ им. А.Ф. Иоффе 0034-2021-0001. Моделирование траекторий БИ с учетом влияния радиального электрического поля выполнено при поддержке проекта РНФ 22-12-00062.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] W.W. Heidbrink, Rev. Sci. Instrum., **81**, 10D727 (2010). DOI: 10.1063/1.3478739
- [2] M. Garcia-Munoz, S. Akaslopolo, O. Asunta, J. Boom, X. Chen, I.G.J. Classen, R. Dux, T.E. Evans, S. Fietz, R.K. Fisher, C. Fuchs, B. Geiger, M. Hoelzl, V. Igochine, Y.M. Jeon, J. Kim, J.Y. Kim, B. Kurzan, N. Lazanyi, T. Lunt, R.M. McDermott, M. Nocente, D.C. Pace, T.L. Rhodes, M. Rodriguez-Ramos, K. Shinohara, W. Suttrop, M.A. Van Zeeland, E. Viezzer, M. Willensdorfer, E. Wolfrum and the ASDEX Upgrade, Nucl. Fusion, **53**, 123008 (2013). DOI: 10.1088/0029-5515/53/12/123008
- [3] B. Geiger, A.N. Karpushov, B.P. Duval, C. Marini, O. Sauter, Y. Andrebe, D. Testa, M. Salewski, P.A. Schneider, the TCV Team and the EUROfusion MST1 Team, in *26th IAEA Fusion Energy Conf.* (Kyoto International Conference Center, 2016), paper EX/P8-30. [https://scipub.euro-fusion.org/wp-content/uploads/eurofusion/WPMST1CP16\\_15132\\_submitted.pdf](https://scipub.euro-fusion.org/wp-content/uploads/eurofusion/WPMST1CP16_15132_submitted.pdf)
- [4] Л.К. Шувалова, Г.И. Абдуллина, Л.Г. Аскинази, А.А. Белокуров, Н.А. Жубр, Е.О. Киселев, В.А. Корнев, С.В. Лебедев, Д.В. Разуменко, А.И. Смирнов, А.С. Тукачинский, В сб *L Междунар. конф. по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу (ICPAF-2023)* (М., 2023), с. 90. DOI: 10.34854/ICPAF.2023.50.2023.1.1.046
- [5] L.E. Stagner, *Inference of the fast-ion distribution function*, PhD thesis (University of California, Irvine, 2018).
- [6] G.V. Pereverzev, P.N. Yushmanov, A. Dnestrovskii, A. Polevoi, K.N. Tarasjan, L. Zakharov, *ASTRA. An automatic system for transport analysis in a tokamak*, report IPP 5/42 (Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, Garching, 1991).
- [7] A. Pankin, D. McCune, R. Andre, G. Bateman, A. Kritz, Comput. Phys. Commun., **159**, 157 (2004). DOI: 10.1016/j.cpc.2003.11.002
- [8] А.Д. Мельник, *Применение корпускулярной диагностики для изучения ионного компонента плазмы в токамаках при нейтральной инжекции*, канд. дис. (ФТИ им. А.Ф. Иоффе, СПб., 2017).
- [9] A.D. Melnik, L.G. Askinazi, V.I. Afanasyev, V.A. Kornev, S.V. Lebedev, M.I. Mironov, V.G. Nesenevich, S.Ja. Petrov, A.S. Tukachinsky, F.V. Chernyshev, Instrum. Exp. Tech., **62**, 373 (2019). DOI: 10.1134/S0020441219030229
- [10] L.G. Askinazi, A.A. Belokurov, D.B. Gin, V.A. Kornev, S.V. Lebedev, A.E. Shevelev, A.S. Tukachinsky, N.A. Zhubr, Nucl. Fusion, **58**, 082003 (2018). DOI: 10.1088/1741-4326/aac10e

- [11] В.А. Корнев, Г.И. Абдуллина, Л.Г. Аскинази, А.А. Белокуров, Н.А. Жубр, С.В. Лебедев, Д.В. Разуменко, А.С. Тукачинский, Письма в ЖТФ, **47** (6), 3 (2021). DOI: 10.21883/PJTF.2021.06.50748.18629 [V.A. Kornev, G.I. Abdullina, L.G. Askinazi, A.A. Belokurov, S.V. Lebedev, D.V. Razumenko, A.S. Tukachinsky, N.A. Zhubr, Tech. Phys. Lett., **47**, 279 (2021). DOI: 10.1134/S1063785021030214].
- [12] K. Tani, M. Honda, T. Oikawa, K. Shinohara, Y. Kusama, T. Sugie, Nucl. Fusion, **55**, 053010 (2015). DOI: 10.1088/0029-5515/55/5/053010