

04.2

Первые результаты диагностики заряженных продуктов синтеза на сферическом токамаке Глобус-М2

© Н.Н. Бахарев¹, О.М. Скрекель¹, А.С. Александров¹, И.М. Балаченков¹, В.И. Варфоломеев¹, В.К. Гусев¹, А.Н. Квашнин², В.Б. Минаев¹, Ю.В. Петров¹, Е.И. Пинженин², Н.В. Сахаров¹, А.Ю. Тельнова¹, Е.М. Хилькевич¹, А.Д. Хильченко², А.Е. Шевелев¹, П.Б. Щеголев¹, К.Д. Шулятьев¹ и команда Глобус-М¹

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

² Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

E-mail: bakharev@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 14 мая 2024 г.

В окончательной редакции 19 июня 2024 г.

Принято к публикации 25 июня 2024 г.

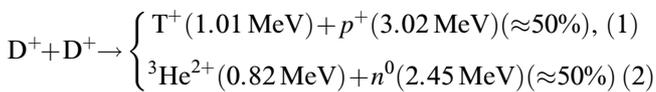
Представлены первые результаты применения диагностики заряженных продуктов ядерного синтеза на токамаке Глобус-М2. Рассмотрены особенности диагностики и полученных данных. Приведены примеры сигналов детектора и результаты их обработки. Обсуждается сравнение с другой диагностикой продуктов ядерного синтеза — нейтронной.

Ключевые слова: сферический токамак, Глобус-М2, быстрые ионы, протоны синтеза, диагностика заряженных продуктов синтеза.

DOI: 10.61011/PJTF.2024.20.58933.19988

Продукты ядерного синтеза несут информацию о пространственном распределении их источника, который в свою очередь зависит от распределений по скоростям участвующих в реакции ядер. В токамаках малых размеров с низким магнитным полем заряженные продукты ядерного синтеза с энергией порядка 1 MeV не удерживаются в плазме. Благодаря этому они могут быть зарегистрированы и использованы в диагностических целях. Настоящая работа посвящена первым результатам применения диагностики заряженных продуктов синтеза на сферическом токамаке Глобус-М2 в зимне-весенней экспериментальной кампании 2024 г.

Реакции ядерного синтеза в токамаке Глобус-М2 (большой радиус 0.36 м, малый радиус 0.24 м, тороидальное магнитное поле B_T до 1 Т, ток плазмы I_p до 500 кА) [1] протекают при взаимодействии быстрых ионов дейтерия, возникающих при инжекции атомов высокой энергии, с ионами дейтерия основной плазмы и друг с другом:



(указаны простые оценки энергий продуктов, полученные в пренебрежении кинетическими энергиями взаимодействующих ядер; пример вычисления энергетического и углового распределений продуктов синтеза без данных пренебрежений можно найти в работах [2,3]). Обе ветви данной реакции имеют примерно одинаковое сечение, и, как следствие, их вероятности примерно равны. Для более точных вычислений может быть использована параметризация дифференциальных сечений, приведенная в работе [4]. Большинство рожденных нейтронов покидают токамак. Для их регистрации применяется ком-

плекс нейтронной диагностики [5]. Однако сложность абсолютной калибровки нейтронной диагностики [6], проблемы восстановления энергетических и пространственных распределений нейтронов [7], а также высокая стоимость нейтронных спектрометров вынуждают использовать дополнительные диагностики, способные осуществлять перекрестную проверку нейтронных измерений, а также дополнять их. Для этих целей может быть использована диагностика заряженных продуктов синтеза.

Применяемая диагностика заряженных продуктов синтеза состоит из полупроводникового диода Д1, разработанного компанией ООО „СНИИП-Плюс“ [8], широкополосного малощумящего усилителя и аккумуляторного блока питания. Подобные детекторы применяются на плазменной установке ГДЛ (ГДЛ — газодинамическая ловушка) [9], а описание диагностики можно найти в работе [10]. Перед детектором была установлена металлическая фольга для защиты от излучения в видимом диапазоне и мягкого рентгеновского излучения, а также от потока всех ионов и атомов, кроме протонов с энергией порядка 3 MeV. В экспериментах были протестированы стальные и молибденовые фольги толщиной от 16 до 30 μm и алюминиевая фольга толщиной от 10 до 42 μm . Было обнаружено, что стальной или молибденовой фольги толщиной 16 μm достаточно для полного поглощения рентгеновского излучения, при этом налетающий протон с энергией 3.02 MeV терял меньше половины энергии, благодаря чему полезный сигнал оставался существенно выше уровня шумов. Фольга такой толщины не пропускает тритоны с энергией 1.01 MeV и гелионы с энергией 0.82 MeV, поэтому рассматриваемая в настоящей работе диагностика является детектором протонов синтеза.

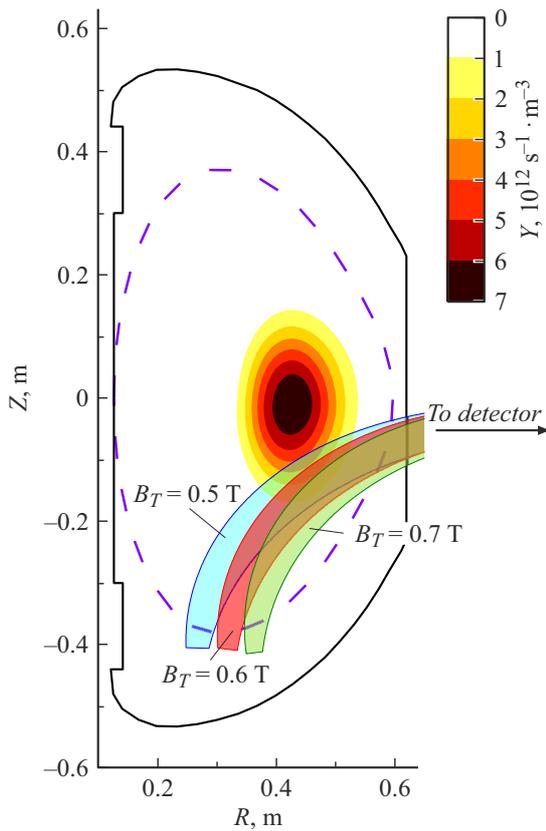


Рис. 1. Область обзора диагностики в разрядах с током плазмы 250 кА и тороидальным магнитным полем 0.5, 0.6 и 0.7 Т. Штриховой линией обозначена последняя замкнутая магнитная поверхность, сплошной линией — стенка камеры. Цветовая карта показывает характерный профиль источника протонов синтеза. Цветной вариант рисунка представлен в электронной версии статьи.

В экспериментах диагностика заряженных продуктов синтеза была установлена на единственный доступный в данной экспериментальной кампании патрубков вблизи экваториальной плоскости на расстоянии примерно 1.3 м от оси установки. Область обзора диагностики в разрядах с $I_p = 250$ кА и $B_T = 0.5, 0.6$ и 0.7 Т показана на рис. 1. Для локализации приведенных областей с помощью орбитального кода [11] рассчитывалось обратное во времени движение ионов водорода с энергией 3.02 МэВ в магнитном поле токамака; при этом стартовая позиция частиц в моделировании определялась положением детектора и его размерами. Различия в представленных на рис. 1 областях обусловлено обратной пропорциональной зависимостью ларморовского радиуса иона от магнитного поля. На рисунке также показан характерный профиль источника протонов синтеза из реакции синтеза (1) (совпадающий с профилем источника нейтронов из реакции (2)), рассчитанный методом, описанным в работе [11]. Расчеты выполнены для разряда с $I_p = 250$ кА, $B_T = 0.6$ Т, средняя плотность электронов $\langle n_e \rangle = 3 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$; инжектируется дейтерий с энергией 28 кеВ, мощность инжекции составляет 500 кВт. Как

видно из рисунка, в детектор попадают протоны, рожденные вне области с наиболее интенсивным протеканием реакции синтеза. Область наблюдения нейтронного детектора охватывает весь плазменный шнур, поэтому сигнал нейтронного детектора определяется преимущественно нейтронами, рождающимися в области с максимальным нейтронным выходом. Благодаря разным областям измерения результаты, полученные с помощью диагностики заряженных продуктов синтеза, дополняют данные нейтронного детектора.

После регистрации протона сигнал с усилителя детектора передается на 14-битный аналого-цифровой преобразователь NI PXIe-5164 с частотой дискретизации 500 МГц. На выходе усилителя каждому зарегистрированному детектором протону соответствует импульс около 150 мВ (для случая, когда перед детектором установлена молибденовая фольга толщиной 30 $\mu\text{м}$) длительностью $< 0.1 \mu\text{s}$.

Обработка полученных осциллограмм проводилась при помощи алгоритма разделения сигнала по форме импульса, реализованного в коде DeGaSum [12]. Использование данного алгоритма вместо простой пороговой дискриминации позволяет разделять наложенные друг на друга импульсы, избегать регистрации ложных событий в случае возникновения шумов высокой амплитуды, а также более точно определять амплитуду импульса и, как следствие, энергию регистрируемого протона. Пример необработанного сигнала детектора протонов синтеза в разряде #44071 продемонстрирован на рис. 2. На нем также представлен пример измеренного сигнала от отдельно зарегистрированного протона и приведена иллюстрация обработки данного события кодом DeGaSum.

Пример обработанных данных, полученных с помощью диагностики протонов синтеза в разряде #44116, показан на рис. 3, а. Тороидальное магнитное поле в рассматриваемом разряде составляло 0.7 Т, средняя плотность электронов составляла примерно $4 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$. На рисунке представлена временная эволюция тока плазмы I_p , сигнала мягкого рентгеновского излучения, скорости счета нейтронного детектора на основе сцинтиллятора BC-501А и скорости счета детектора протонов синтеза. Инжекция дейтерия с энергией 40 кеВ мощностью примерно 700 кВт началась на стадии роста тока на 130 мс. Как видно из рисунка, эволюция нейтронного и протонного потоков имеет схожую временную зависимость, однако существуют небольшие различия. Во-первых, регистрация протонов начинается только спустя 6 мс после старта инжекции, когда I_p достигает 200 кА. Это связано с тем, что в области вблизи границы плазмы, откуда поступает существенная часть сигнала протонного детектора, инжектируемые быстрые частицы теряются при низких значениях I_p . Потери происходят за короткие времена из-за попадания ионизированных атомов в стенку токамака (так называемые потери с первой орбиты) [13]. Во-вторых, рост сигнала протонного детектора заканчивается на 155 мс, что примерно на 6 мс

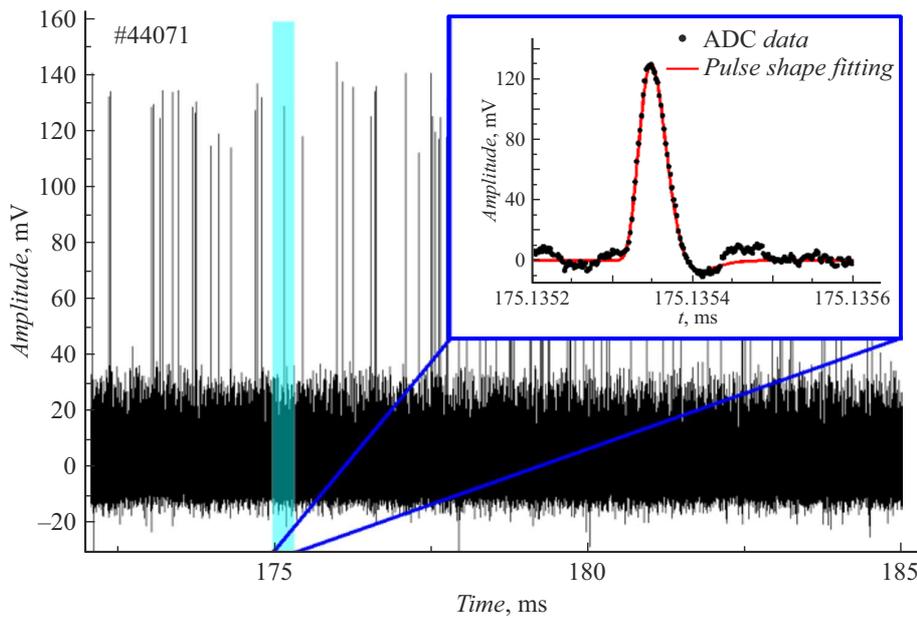


Рис. 2. Пример необработанного сигнала детектора протонов синтеза в разряде #44071 и иллюстрация работы алгоритма разделения сигналов протонов по форме импульса.

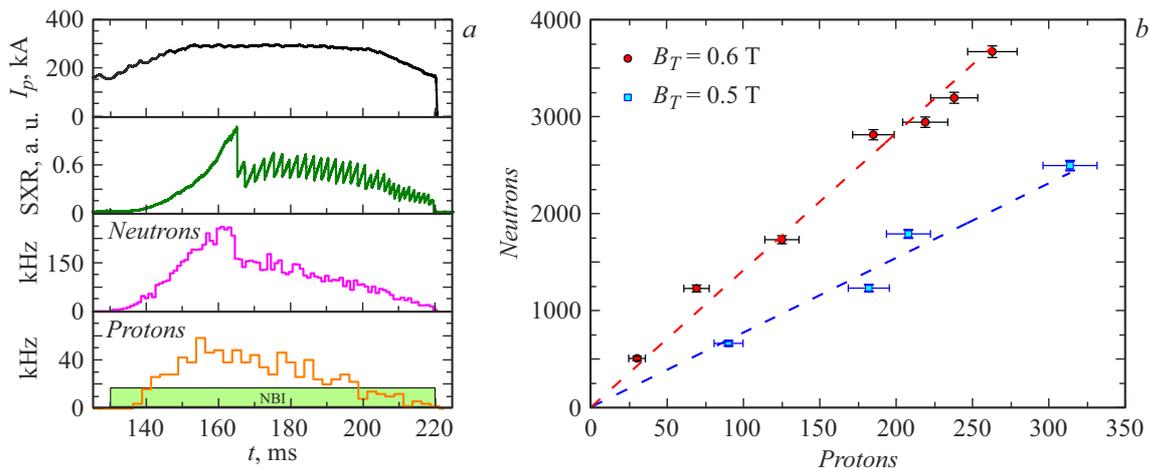


Рис. 3. *a* — осциллограмма разряда #44116. Сверху вниз: ток плазмы, сигнал детектора мягкого рентгеновского излучения, скорость счета нейтронного детектора, скорость счета протонного детектора. Прямоугольником внизу отмечен временной интервал, где осуществлялась инжекция атомов высокой энергии. *b* — зависимость числа зарегистрированных нейтронов от числа зарегистрированных протонов для двух значений тороидального магнитного поля. Интервалы соответствуют одному стандартному отклонению в предположении, что регистрация протонов и нейтронов подчиняется распределению Пуассона.

раньше, чем заканчивается рост сигнала нейтронного детектора. Данная особенность связана с тем, что время замедления быстрых ионов в центре, где рождается существенная часть регистрируемых нейтронов, примерно в 2 раза выше, чем в более периферийной области, где рождаются регистрируемые протоны синтеза. Из-за этого распределение быстрых ионов в центральной области плазмы становится равновесным позже, чем на периферии. В-третьих, на 164 ms нейтронный сигнал резко падает. Причиной такого падения является перераспределение быстрых и тепловых ионов в центральной области плазмы при перезамыкании. Аналогичное

падение отсутствует на сигнале протонного детектора. Скорее всего, это связано с тем, что концентрация ионов (быстрых и тепловых) в более периферийной области, где рождаются регистрируемые протоны синтеза, при перезамыкании меняется незначительно.

В экспериментах также была получена зависимость числа нейтронов, зарегистрированных детектором на основе сцинтиллятора BC-501A, от числа протонов, зарегистрированных диагностикой протонов синтеза, в разрядах с $B_T = 0.5$ и 0.6 Т. Данная зависимость показана на рис. 3, *b*. Ток плазмы в разрядах составлял 250 кА. Каждая точка на графике соответствует числу

зарегистрированных частиц в одном разряде со 130 по 180 ms. Скорость реакции синтеза варьировалась с помощью одновременного изменения энергии и мощности инъекции с 30 до 40 keV и с 300 до 700 kW соответственно. Как видно из рисунка, в эксперименте для каждого значения V_T была получена линейная зависимость, что, скорее всего, указывает на слабое изменение профиля источника протонов синтеза при поэтапном увеличении энергии инъекции с 30 до 40 keV. Разность в коэффициенте наклона линейных зависимостей связана с изменением области, откуда протоны попадают в детектор (рис. 1).

Таким образом, диагностика заряженных продуктов синтеза была успешно протестирована на токамаке Глобус-М2. В следующей экспериментальной кампании положение диагностики будет изменено для увеличения потока протонов на детектор. В дальнейшем будет рассмотрена возможность установки нескольких детекторов протонов синтеза для восстановления пространственного распределения их источника.

Благодарности

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

Финансирование работы

Подготовка нагревных систем токамака выполнена в рамках госзадания 0034-2021-0001, а подготовка диагностических систем токамака — в рамках госзадания 0034-2024-0028.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Yu.V. Petrov, V.K. Gusev, N.V. Sakharov, V.B. Minaev, V.I. Varfolomeev, V.V. Dyachenko, I.M. Balachenkov, N.N. Bakharev, E.N. Bondarchuk, V.V. Bulanin, F.V. Chernyshev, M.V. Iliasova, A.A. Kavin, E.M. Khilkevitch, N.A. Khromov, E.O. Kiselev, A.N. Konovalov, V.A. Kornev, S.V. Krikunov, G.S. Kurskiev, A.D. Melnik, I.V. Miroshnikov, A.N. Novokhatskii, N.S. Zhiltsov, M.I. Patrov, A.V. Petrov, A.M. Ponomarenko, K.D. Shulyatiev, P.B. Shchegolev, A.E. Shevelev, O.M. Skrekel, A.Yu. Telnova, E.A. Tukhmenova, V.A. Tokarev, S.Yu. Tolstyakov, A.V. Voronin, A.Yu. Yashin, P.A. Bagryansky, E.G. Zhilin, V.A. Goryainov, Nucl. Fusion, **62** (4), 042009 (2022). DOI: 10.1088/1741-4326/ac27c7
- [2] P.R. Goncharov, Nucl. Fusion, **55** (6), 063012 (2015). DOI: 10.1088/0029-5515/55/6/063012
- [3] P.R. Goncharov, N.N. Bakharev, Plasma Phys. Control. Fusion, **62** (12), 125016 (2020). DOI: 10.1088/1361-6587/abc08d
- [4] P.R. Goncharov, Atom. Data Nucl. Data Tabl., **120** (1), 121 (2018). DOI: 10.1016/j.adt.2017.05.006
- [5] 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. Щеголев, 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. Ilyasova, 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. Tukhmenova, E.M. Khilkevich, 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].
- [6] О.М. Скрекель, Н.Н. Бахарев, В.И. Варфоломеев, В.К. Гусев, М.В. Ильясова, А.Ю. Тельнова, Е.М. Хилькевич, А.Е. Шевелев, ЖТФ, **92** (1), 32 (2022). DOI: 0.21883/JTF.2022.01.51848.151-21 [O.M. Skrekel, N.N. Bakharev, V.I. Varfolomeev, V.K. Gusev, M.V. Ilyasova, A.Yu. Telnova, E.M. Khilkevich, A.E. Shevelev, Tech. Phys., **67** (1), 12 (2022). DOI: 10.21883/TP.2022.01.52526.151-21].
- [7] M.V. Iliasova, A.E. Shevelev, E.M. Khilkevitch, N.N. Bakharev, O.M. Skrekel, V.B. Minaev, D.N. Doinikov, D.B. Gin, V.K. Gusev, V.A. Kornev, V.O. Naidenov, A.N. Novokhatskii, Yu.V. Petrov, I.A. Polunovsky, N.V. Sakharov, P.B. Shchegolev, A.Yu. Telnova, V.I. Varfolomeev, Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A, **1029**, 166425 (2022). DOI: 10.1016/j.nima.2022.166425
- [8] <https://sniipplus.ru/>
- [9] P.A. Bagryansky, V.V. Maximov, E.I. Pinzhenin, V.V. Prikhodko, Fusion Sci. Technol., **59** (1T), 256 (2011). DOI: 10.13182/FST11-A11627
- [10] Е.И. Пинженин, В.В. Максимов, ПТЭ, № 2, в печати (2024).
- [11] N.N. Bakharev, F.V. Chernyshev, P.R. Goncharov, V.K. Gusev, A.D. Ibyaminova, 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, Nucl. Fusion, **55** (4), 043023 (2015). DOI: 10.1088/0029-5515/55/4/043023
- [12] О.М. Скрекель, Н.Н. Бахарев, В.К. Гусев, Е.О. Киселев, Письма в ЖТФ, **47** (4), 22 (2021). DOI: 10.21883/PJTF.2021.04.50640.18548 [O.M. Skrekel, N.N. Bakharev, V.K. Gusev, E.O. Kiselev, Tech. Phys. Lett., **47** (2), 177 (2021). DOI: /10.1134/S1063785021020280].
- [13] Е.М. Хилькевич, А.Е. Шевелев, И.Н. Чугунов, М.В. Ильясова, Д.Н. Дойников, Д.Б. Гин, В.О. Найденов, И.А. Полуновский, Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A, **977**, 164309 (2020). DOI: 10.1016/j.nima.2020.164309