

04

Проект диагностики потерь быстрых ионов для токамака Глобус-М2

© А.С. Александров, Н.Н. Бахарев, В.И. Варфоломеев, А.Д. Мельник, В.Б. Минаев, И.В. Мирошников, О.М. Скрекель

ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: xela.xela231@gmail.com

Поступило в Редакцию 13 апреля 2026 г.
В окончательной редакции 28 мая 2026 г.
Принято к публикации 29 мая 2026 г.

Представлен проект диагностики потерь быстрых ионов для токамака Глобус-М2. Описаны принцип ее работы, состав и конструкция. Рассчитаны характеристики разработанной диагностики. Приведены результаты расчета весовой функции и оценки разрешения по энергиям для дейтериевых ионов.

Ключевые слова: сферический токамак, Глобус-М2, быстрые ионы, диагностика потерь быстрых ионов, FILD.

DOI: 10.61011/PJTF.2026.17.63478.20725

Быстрые ионы (БИ) — это ионы с энергией, значительно (в несколько раз и более) превышающей ионную температуру плазмы. БИ могут образовываться в плазме в результате ее нагрева с помощью нейтральной инжекции или электромагнитных волн ионно-циклотронного диапазона, а также в результате протекания реакций термоядерного синтеза [1]. Потери БИ могут снижать эффективность нагрева, повреждать стенки токамака и приводить к срыву разрядов [2]. По этим причинам исследование характеристик таких потерь с целью поиска способов их минимизации является весьма актуальной задачей.

Глобус-М2 [3–5] представляет собой компактный сферический токамак (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). Одной из основных тематик исследований на токамаке Глобус-М2 является изучение удержания БИ. На многих установках для изучения потерь БИ применяется диагностика FILD (Fast Ion Loss Detector) [6–8]. На токамаке Глобус-М2 на данный момент подобная диагностика отсутствует, и с целью расширения диагностических возможностей токамака был разработан описываемый проект FILD.

FILD представляет собой прибор, позволяющий измерять энергию и питч-угол (угол между векторами скорости частицы и магнитного поля токамака) вылетающих из плазмы ионов. Этот прибор должен быть расположен внутри вакуумной камеры токамака вблизи границы плазмы со стороны слабого поля около экватора (рис. 1, c), поскольку именно в этой области на токамаке Глобус-М2 наблюдается наибольшее количество потерь. Основными элементами диагностики являются головка детектора, коллиматор, сцинтиллятор, система регистрации и система позиционирования. Положение, форма и размеры головки детектора, коллиматора и сцинтиллятора, а также параметры системы регистрации определяют большинство характеристик диагностики.

Принцип работы диагностики представлен на рис. 1. Вылетевшие из плазмы (потерянные) быстрые ионы попадают в коллиматор головки детектора (рис. 1, c). Прошедшие внутрь прибора ионы распределяются в пространстве магнитным полем установки по энергии (рис. 1, b) и питч-углу (рис. 1, a) и попадают в разные точки на пластине с тонким слоем сцинтиллирующего материала, свечение которого фиксируется системой регистрации на основе высокоскоростной камеры. Для FILD на токамаке Глобус-М2 будет использована камера Revealer X213 (Fuhuang AgileDevice High-tech Information Technology Co., Ltd.) с частотой кадров от 13.6 kHz (при разрешении 1280×1024 пикселей) до 1 MHz (при разрешении 1280×8 пикселей) [9]. Система позиционирования используется для перемещения головки детектора внутри вакуумной камеры токамака.

Для определения энергии и питч-угла регистрируемых частиц используется карта упавших частиц (strike map). Она связывает энергию и питч-угол иона с точкой его попадания на пластину-сцинтиллятор. Для расчета карт упавших частиц с помощью кода ASCOT [10] решается уравнение движения внутри головки детектора для наборов ионов с разными энергиями и питч-углами и заданными зарядом и массой в магнитном поле токамака, рассчитанном с помощью кода ruGSS [11]. Орбиты рассчитываются с шагом по времени $dt = 10^{-11}$ с от момента попадания в коллиматор до столкновения со сцинтиллятором или стенкой коллиматора. Примеры рассчитанных траекторий для ионов различных энергий и питч-углов показаны на рис. 1, d.

Следует отметить, что у частиц с одинаковыми энергией и питч-углом могут быть различные начальные фазы ларморовского вращения и положения на щели коллиматора, поэтому они не попадают в одну точку (рис. 1, d), а занимают некоторую конечную область на сцинтилляторе, обуславливая конечное разрешение диагностики. Например, ионы дейтерия с энергией 50 keV и питч-углом 65° попадают в прямоугольную область

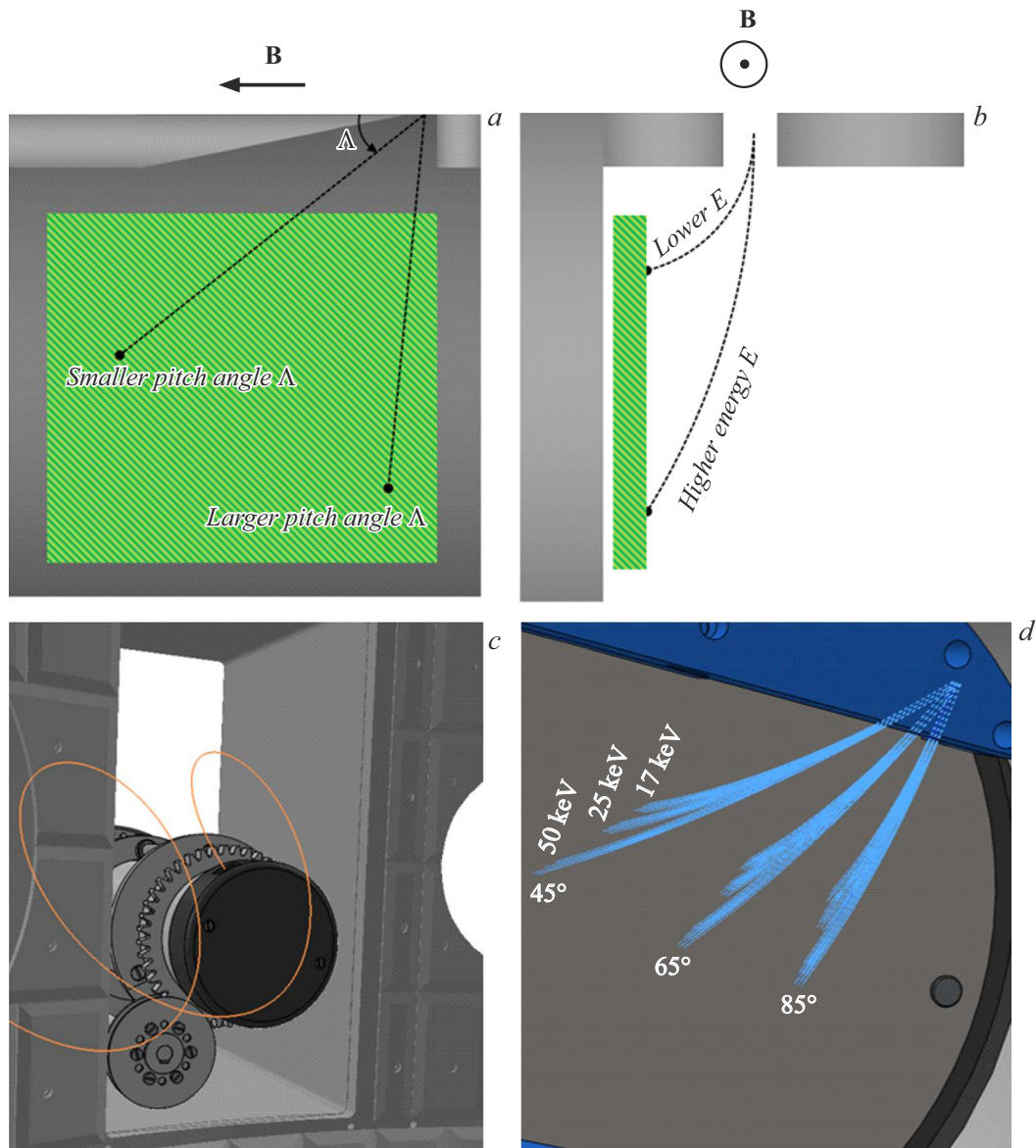


Рис. 1. Принцип работы FILD. *a, b* — внутри головки детектора (схема). *a* — вид поперек направления магнитного поля токамака (вдоль головки детектора). *b* — вид против направления магнитного поля токамака (сбоку головки детектора). Пунктиром показаны траектории ионов, имеющих различные питч-углы (*a*) и энергии (*b*). Зеленой штриховкой показана скintилирующая пластина. *c* — головка детектора FILD внутри камеры токамака Глобус-М2. Оранжевой линией показана орбита быстрого иона (энергия $E = 50 \text{ keV}$, питч-угол $\Lambda = 65^\circ$), попавшего в коллиматор. *d* — рассчитанные траектории наборов ионов дейтерия с энергиями 17, 25 и 50 keV и питч-углами 45, 65 и 85° внутри головки детектора FILD. Цветной вариант рисунков представлен в электронной версии статьи.

на скintилляторе длиной 8 mm и шириной 0.9 mm, расположенную вдоль оси энергии. В связи с этим для определения точки на пластине, соответствующей определенной энергии и питч-углу, рассчитывается движение набора частиц, равномерно распределенных по входной щели коллиматора и по фазам ларморовского вращения. Координата искомой точки вычисляется как среднее арифметическое координат всех точек, в которые попали частицы из рассматриваемого набора.

Пример карты упавших частиц, построенной для FILD на токамаке Глобус-М2, показан на рис. 2, *a* черными

линиями. Чтобы получить эту карту, были рассчитаны траектории 91 набора (13 по энергии: от 5 до 65 keV с шагом 5 keV; 7 по питч-углам: от 25 до 85° с шагом 10°) из 31 500 ионов дейтерия в каждом, равномерно распределенных по плоскости входной щели коллиматора и по начальным фазам вращения. Магнитная конфигурация взята для разряда токамака Глобус-М2 № 37001 с током плазмы $I_p = 220 \text{ kA}$, вытянутостью $\kappa = 1.93$, треугольностью $\delta = 0.3$, тороидальным магнитным полем $B_T = 0.7 \text{ T}$. Карты упавших частиц и описанные далее расчетные функции могут быть получены также для

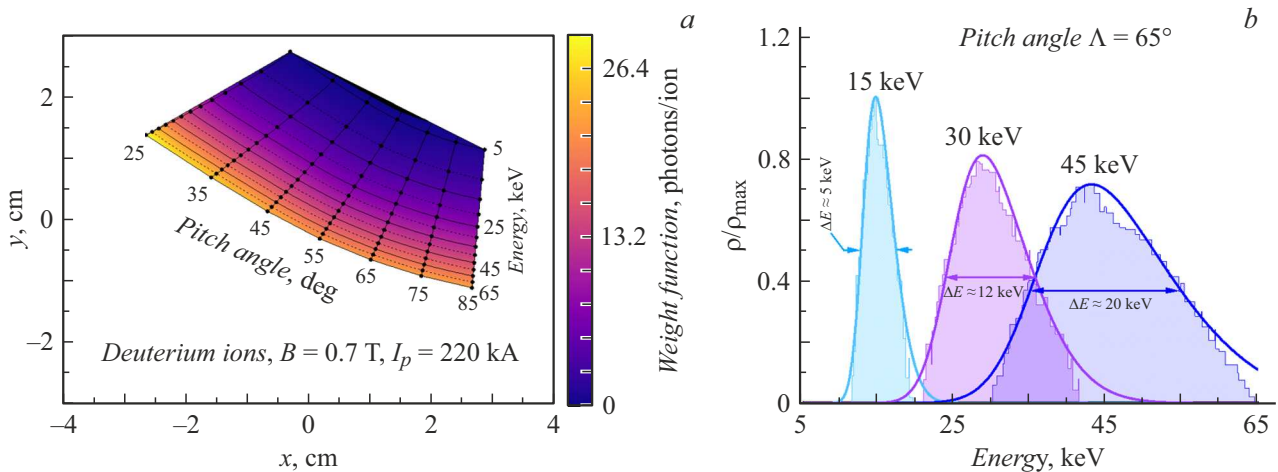


Рис. 2. *a* — карта упавших частиц (черные линии) и весовая функция (цвет), *b* — энергетическое распределение частиц различных энергий при постоянном питч-угле.

других параметров разряда, энергий и сортов частиц, положения детектора и могут заметно отличаться от приведенных в настоящей работе расчетов. В будущем для обработки экспериментальных данных параметры расчетов будут устанавливаться в соответствии с реальными параметрами эксперимента.

Для определения абсолютных значений потоков потерянных БИ используется весовая функция $W(\Lambda, E)$. Весовая функция связывает поток попадающих во входное отверстие коллиматора ионов с определенной энергией и питч-углом ($\Gamma_{pinhole}^{ion}$) с потоком фотонов, излучаемых сцинтиллятором из-за попадания в него этих ионов (Γ_{scint}^{photon}):

$$\Gamma_{scint}^{photon} = W(\Lambda, E)\Gamma_{pinhole}^{ion}.$$

Весовая функция $W(\Lambda, E)$ вычисляется следующим образом:

$$W(\Lambda, E) = \frac{N_{scint}^{ion}}{N_{pinhole}^{ion}}S(E),$$

где $N_{pinhole}^{ion}$ — число всех ионов с данными Λ, E , для которых рассчитываются траектории; N_{scint}^{ion} — число ионов с данными Λ, E , траектории которых прошли через коллиматор и попали на сцинтиллятор; $S(E)$ — световыход сцинтиллятора. Световыход сцинтиллятора CsI (Т1), используемого для FILD на токамаке Глобус-М2, равен 54 photons/keV, а его характерное время затухания — 1 μ s. Итоговая весовая функция показана на рис. 2, *a* цветом.

Для оценки разрешения диагностики рассчитывается плотность распределения частиц на пластине. Для этого на пластине строится двумерная гистограмма размером 360 \times 480 ячеек, где высота столбцов равна ρ — числу частиц, попавших в соответствующую ячейку. После этого полученная плотность распределения частиц в пространстве с помощью карты упавших частиц преобразуется в плотность распределения по питч-углам и

энергиям. Ширина этого распределения по питч-углам мала и равна примерно 1° , в связи с чем рассматривается распределение частиц только по энергиям. Такое распределение (нормированное на максимальное значение $\rho = \rho_{max}$) показано на рис. 2, *b* для частиц с энергиями 15, 30 и 45 keV и питч-углом 65° . Помимо описанной выше гистограммы также показана ее аппроксимация косым нормальным распределением (skew Gaussian), как это было проделано в работе [12]. Разрешение диагностики можно оценить как полуширину полученных кривых. Согласно такой оценке, энергетическое разрешение ΔE изменяется от 5 до 20 keV с ростом энергии измеряемых частиц от 15 до 45 keV (рис. 2, *b*).

Приведенная оценка является оценкой сверху. Она была использована в ходе проектирования диагностики при рассмотрении разных вариантов конструкции головки детектора, чтобы понять зависимость энергетического разрешения от размерных параметров. Более точные расчеты разрешения были проведены для FILD на токамаках ASDEX [12] и JET [13]. В этих работах рассчитанное энергетическое разрешение оказалось в 3–4 раза меньше оценок, подобных нашей.

На рис. 3 показан общий вид диагностики FILD на токамаке Глобус-М2. Головка детектора (рис. 3, позиция 4) представляет собой трубу из нержавеющей стали с внутренним диаметром 100 mm и длиной 380 mm. На ее конце находятся коллиматор (рис. 3, позиция 6) и пластина размером 60 \times 80 mm, покрытая сцинтиллятором, защищенные от контакта с плазмой графитовым колпаком (рис. 3, позиция 7). Размеры пластины были выбраны так, чтобы можно было регистрировать ионы дейтерия с энергией 50 keV (максимальной энергией нейтральной инжекции) при минимальном магнитном поле на оси токамака $B_T = 0.5$ T. Сигнал сцинтиллятора регистрируется высокоскоростной камерой через окно из кварцевого стекла (рис. 3, позиция 2).

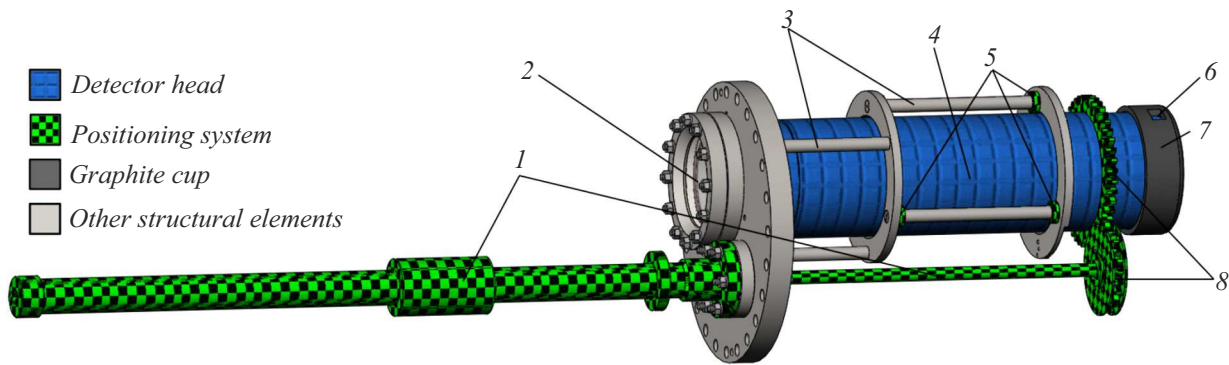


Рис. 3. Общий вид диагностики. Зеленым цветом выделены элементы системы позиционирования диагностики, синим цветом — головка детектора. 1 — вакуумный манипулятор вращения и линейного перемещения, 2 — окно из кварцевого стекла для наблюдения за сцинтиллятором, 3 — направляющие линейного перемещения детектора, 4 — головка детектора, 5 — керамические подшипники, 6 — отверстие коллиматора, 7 — графитовый колпак, 8 — система шестеренок.

Карта упавших частиц, весовая функция и разрешение диагностики (рис. 2) рассчитывались в предположении, что коллиматор расположен параллельно линии магнитного поля (как на рис. 1, а). Поскольку угол между линией магнитного поля и экваториальной плоскостью зависит от величины тороидального магнитного поля и силы тока плазмы, для диагностики предусмотрена возможность вращения вокруг своей оси. Также диагностика имеет возможность линейного перемещения детектора по направляющим (рис. 3, позиции 3) вдоль направления большого радиуса установки, чтобы можно было задвигать ее в патрубок, если измерения не требуются. Разработанная система позиционирования (рис. 3, зеленый цвет) использует вакуумный манипулятор вращения и линейного перемещения СНИ-VAC ICF70-MT-500 (рис. 3, позиция 1), движение которого передается на головку детектора с помощью шестеренок (рис. 3, позиции 8). Для обеспечения вращения также используются подшипники (рис. 3, позиции 5).

В результате разработанная для токамака Глобус-М2 диагностика FILD будет обладать следующими характеристиками. Рабочий диапазон составляет от 25 до 85° по питч-углам и от 5 до 65 keV по энергиям для ионов дейтерия при тороидальном магнитном поле $B_T = 0.5$ Т. Верхняя граница рабочего диапазона по энергиям напрямую связана с ларморовским радиусом частиц при фиксированной энергии, т.е. она увеличивается при уменьшении массы частиц и увеличении тороидального магнитного поля. Диапазон измерения по питч-углам не зависит от параметров разряда, и его можно изменять путем вращения головки детектора вокруг своей оси. Наилучшее возможное временное разрешение диагностики 1 μ s. Коллиматор был спроектирован таким образом, чтобы его можно было заменить на другой с целью изменения характеристик диагностики.

После внедрения новой диагностики в эксплуатацию ее планируется использовать для измерения потерь БИ с первой орбиты [14], а также для продолжения экспериментального исследования потерь быстрых ионов,

вызванных неустойчивостями в плазме, в том числе альфвеновскими неустойчивостями [15].

Финансирование работы

Разработка конструкции диагностики выполнена в соответствии с государственным заданием FFUG-2021-0001. Расчет характеристик диагностики осуществлен в соответствии с государственным заданием FFUG-2024-0028.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] W.W. Heidbrink, G.J. Sadler, Nucl. Fusion, **34** (4), 535 (1994). DOI: 10.1088/0029-5515/34/4/I07
- [2] Н.Н. Бахарев, И.М. Балаченков, В.И. Варфоломеев, В.К. Гусев, Е.О. Киселев, Г.С. Курский, А.Д. Мельник, В.Б. Минаев, И.В. Мирошников, Ю.В. Петров, Н.В. Сахаров, О.М. Скрекель, А.Ю. Тельнова, В.А. Токарев, Е.А. Тухменева, Ф.В. Чернышев, П.Б. Щеголев, А.Ю. Яшин, Физика плазмы, **49** (12), 1317 (2023). DOI: 10.31857/S0367292123600905 [N.N. Bakharev, I.M. Balachenkov, V.I. Varfolomeev, V.K. Gusev, E.O. Kiselev, G.S. Kurskiy, A.D. Melnik, V.B. Minaev, I.V. Miroshnikov, Yu.V. Petrov, N.V. Sakharov, O.M. Skrekel, A.Yu. Telnova, V.A. Tokarev, E.A. Tukhmeneva, F.V. Chernyshev, P.B. Shchegolev, A.Yu. Yashin, Plasma Phys. Rep., **49** (12), 1524 (2023). DOI: 10.1134/S1063780X23601384].
- [3] 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. Курский, А.Д. Мельник, В.Б. Минаев, А.Б. Минсеев, 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. P'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. Skrekkel, A.E. Solomakhin, V.V. Solokha, A.Yu. Tel'nova, 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].
- [4] 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
- [5] V.B. Minaev, V.K. Gusev, N.V. Sakharov, Yu.V. Petrov, V.I. Varfolomeev, N.N. Bakharev, V.A. Belyakov, P.N. Brunkov, V.V. Bulanin, 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.D. Melnik, A.B. Mineev, M.I. Mironov, I.V. Miroshnikov, A.N. Novokhatskii, K.Yu. Oshuev, M.I. Patrov, A.V. Petrov, V.A. Rozhansky, A.N. Saveliev, I.Yu. Senichenkov, P.B. Shchegolev, I.V. Shikhovtsev, A.D. Sladkomedova, V.V. Solokha, D.S. Sorokina, A.Yu. Telnova, V.A. Tokarev, S.Yu. Tolstyakov, A.Yu. Yashin, E.G. Zhilin, *J. Phys.: Conf. Ser.*, **1094**, 012001 (2018). DOI: 10.1088/1742-6596/1094/1/012001
- [6] M. Garcia-Munoz, H.U. Fahrbach, H. Zohm, ASDEX Upgrade Team, *Rev. Sci. Instrum.*, **80** (5), 053503 (2009). DOI: 10.1063/1.3121543
- [7] J.F. Rivero-Rodriguez, M. Garcia-Munoz, R. Martin, J. Galdon-Quiroga, J. Ayllon-Guerola, R.J. Akers, J. Buchanan, D. Croft, D. Garcia-Vallejo, J. Gonzalez-Martin, D. Harvey, K.G. McClements, M. Rodriguez-Ramos, L. Sanchis, *Rev. Sci. Instrum.*, **89** (10), 10P112 (2018). DOI: 10.1063/1.5039311
- [8] J.F. Rivero-Rodriguez, C. Perez Von Thun, M. Garcia-Muñoz, P. Beaumont, V. Kiptily, J. Garcia-Lopez, V. Goloborodko, M.C. Jimenez-Ramos, M. Rodriguez-Ramos, K. Schoepf, V. Yavorskij, *JET Contributors, Rev. Sci. Instrum.*, **92** (4), 043553 (2021). DOI: 10.1063/5.0043760
- [9] *Каталог высокоскоростных камер Revealer серии X* [Электронный ресурс]. <https://revealer.ru/products/high-speed-camera/revealer-serija-x-vysokoskorostnaja-videokamera>
- [10] J. Varje, K. Särkimäki, J. Kontula, P. Ollus, T. Kurki-Suonio, A. Snicker, E. Hirvijoki, S. Äkäslompolo, arXiv:1908.02482 (2019). DOI: 10.48550/arXiv.1908.02482
- [11] Е.О. Киселев, И.М. Балаченко, Н.Н. Бахарев, В.И. Варфоломеев, В.К. Гусев, Н.С. Жильцов, О.А. Зенкова, А.А. Кавин, Г.С. Курскиев, В.Б. Минаев, И.В. Мирошников, М.И. Патров, Ю.В. Петров, Н.В. Сахаров, О.М. Скrekkel, В.В. Солоха, А.Ю. Тельнова, Е.Е. Ткаченко, В.А. Токарев, Е.А. Тюхменева, Н.А. Хромов, П.Б. Щеголев, *Физика плазмы*, **49** (12), 1357 (2023). DOI: 10.31857/S0367292123601224 [Е.О. Киселев, И.М. Балаченко, Н.Н. Бахарев, В.И. Варфоломеев, В.К. Гусев, Н.С. Жильцов, О.А. Зенкова, А.А. Кавин, Г.С. Курскиев, В.Б. Минаев, И.В. Мирошников, М.И. Патров, Ю.В. Петров, Н.В. Сахаров, О.М. Скrekkel, V.V. Solokha, A.Yu. Telnova, E.E. Tkachenko, V.A. Tokarev, E.A. Tukhmeneva, N.A. Khromov, P.B. Shchegolev, *Plasma Phys. Rep.*, **49** (12), 1560 (2023). DOI: 10.1134/S1063780X23601657].
- [12] J. Galdon-Quiroga, M. Garcia-Munoz, M. Salewski, A.S. Jacobsen, L. Sanchis-Sanchez, M. Rodriguez-Ramos, J. Ayllon-Guerola, J. Garcia-Lopez, J. Gonzalez-Martin, M.C. Jimenez-Ramos, J.F. Rivero-Rodriguez, E. Viezzer, ASDEX Upgrade Team, *Plasma Phys. Control. Fusion*, **60** (10), 105005 (2018). DOI: 10.1088/1361-6587/aad76e
- [13] J.F. Rivero-Rodriguez, C. Perez Von Thun, M. Garcia-Muñoz, P. Beaumont, V. Kiptily, J. Garcia-Lopez, V. Goloborodko, M.C. Jimenez-Ramos, M. Rodriguez-Ramos, K. Schoepf, V. Yavorskij, *JET Contributors, Rev. Sci. Instrum.*, **92** (4), 043553 (2021). DOI: 10.1063/5.0043760
- [14] 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
- [15] N.N. Bakharev, I.M. Balachenkov, F.V. Chernyshev, V.K. Gusev, M.V. Iliasova, E.M. Khilkevitch, N.A. Khromov, E.O. Kiselev, V.A. Kornev, G.S. Kurskiev, A.D. Melnik, V.B. Minaev, M.I. Mironov, I.V. Miroshnikov, Yu.V. Petrov, N.V. Sakharov, P.B. Shchegolev, A.E. Shevelev, O.M. Skrekkel, A.Yu. Telnova, V.A. Tokarev, E.A. Tukhmeneva, V.I. Varfolomeev, A.Yu. Yashin, V.V. Zabrodsky, *Phys. Plasmas*, **30** (7), 072507 (2023). DOI: 10.1063/5.0156337