

УДК 533.9

СИНТЕТИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА СПЕКТРОВ АТОМОВ ПЕРЕЗАРЯДКИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ МГД-НЕУСТОЙЧИВОСТЕЙ НА УДЕРЖАНИЕ БЫСТРЫХ ЧАСТИЦ В СФЕРИЧЕСКИХ ТОКАМАКАХ ГЛОБУС-М/М2

© 2023 г. Е. О. Киселев^{a,b,*}, И. М. Балаченков^a, Н. Н. Бахарев^a, В. И. Варфоломеев^a,
А. В. Воронин^a, В. Ю. Горяинов^a, В. К. Гусев^a, Н. С. Жильцов^a, О. А. Зенкова^{a,b}, Г. С. Курскиев^a,
А. Д. Мельник^a, В. Б. Минаев^a, И. В. Мирошников^a, М. И. Патров^a, Ю. В. Петров^a,
Н. В. Сахаров^a, О. М. Скрекель^a, А. Ю. Тельнова^a, Е. Е. Ткаченко^a, В. А. Токарев^a,
Е. А. Тюхменева^a, Н. А. Хромов^a, Ф. В. Чернышев^a, П. Б. Щеголев^a

^aФизико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

^bПолитехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: nightkeo@gmail.com

Поступила в редакцию 22.06.2023 г.

После доработки 01.10.2023 г.

Принята к публикации 09.10.2023 г.

Приведены результаты численной оценки поглощенной мощности пучка нейтральной инжекции в сферических токамаках Глобус-М/М2. Моделирование замедления быстрых частиц проведено с помощью NUBEAM. Кодом FIDASIM проведено моделирование сигнала анализатора атомов перезарядки с использованием функции распределения быстрых ионов, рассчитанной кодом NUBEAM. Сравнение рассчитанного сигнала с экспериментальным позволило определить степень влияния неустойчивостей на удержание быстрых частиц, а также на уровень поглощенной мощности пучка.

Ключевые слова: сферический токамак, высокотемпературная плазма, пучки нейтральных частиц, анализатор атомов перезарядки, FIDASIM, NUBEAM

DOI: 10.31857/S0367292123600802, **EDN:** CGSHYQ

1. ВВЕДЕНИЕ

Результаты недавних экспериментов по нагреву плазмы на токамаке Глобус-М2 [1] показали, что достижение высоких значений температуры ионов плазмы возможно на компактной установке с малым радиусом примерно 24 см при тороидальном магнитном поле $B_T \leq 0.9$ Тл [2, 3]. На Глобус-М2 с помощью нейтральной инжекции был получен режим с горячими ионами, температура которых достигала около 5 кэВ при плотности плазмы 8×10^{19} м⁻³. Позднее режим с горячими ионами был продемонстрирован на более крупном токамаке ST40, где удалось достичь значения T_i до 9 кэВ благодаря более высокому значению тороидального магнитного поля [4].

Действительно, применение дополнительных методов нагрева, таких как инжекция нейтральных частиц высокой энергии, необходимо для будущего термоядерного реактора, так как эффективность нагрева пучками частиц не уменьшается с температурой как при омическом нагреве, что

позволяет нагреть плазму до высоких температур. Быстрые ионы, возникающие при дополнительном нагреве с помощью нейтральной инжекции (НИ), в процессе торможения передают энергию электронам и ионам плазмы до тех пор, пока не замедлятся до тепловых энергий. Моделирование поведения быстрых частиц позволяет рассчитать поглощенную плазмой мощность пучка, которая является важной характеристикой при анализе переноса тепла и частиц. Однако быстрые ионы могут теряться из плазмы, если после ионизации атомов пучка они попадают на неустойчивые орбиты (орбитальные потери). Дополнительными каналами потерь быстрых ионов плазмы являются реакции перезарядки и рекомбинации (потери на перезарядку), а также потери в результате воздействия неустойчивостей. Кроме того, инжектируемые атомы, имеющие достаточно высокую скорость, могут пролетать сквозь плазму, не ионизовавшись (потери на пролет). Потери быстрых частиц влияют на величину поглощенной мощности пучка. Классические механизмы по-

ть (орбитальные, на перезарядку и на пролет) обычно включены в компьютерные коды для моделирования НИ. В то же время существует еще один канал потерь быстрых ионов, связанный с наличием в плазме различного рода неустойчивостей. Влияние неустойчивостей, как правило, не учитывается при моделировании, из-за чего расчет замедления быстрых частиц с классическим удержанием при наличии неустойчивостей может дать завышенные значения поглощенной мощности.

Эксперименты на токамаках Глобус-М и -М2 показали, что Альфвеновские моды [5–10] и пилообразные колебания [11] в значительной степени влияют на функцию распределения быстрых частиц. Для количественной оценки степени влияния неустойчивостей на удержание быстрых частиц и на значение поглощенной мощности в уравнение, описывающее замедление ионов, может быть введен дополнительный коэффициент аномальной диффузии быстрых ионов. Коэффициент аномальной диффузии имитирует воздействие неустойчивостей на быстрые ионы через дополнительное смещение вектора скорости и положения частицы. Оценка этого коэффициента в таком случае может быть осуществлена с помощью так называемой синтетической диагностики, заключающейся в сравнении синтетического (расчетного) и экспериментального сигнала, возникающего из-за быстрых частиц и получаемого с помощью какого-либо диагностического метода. Данная работа посвящена результатам применения в качестве такого метода корпускулярную диагностику, использующую анализатор атомов перезарядки (NPA) [12].

Основоположниками метода корпускулярной диагностики являются В.В. Афросимов и М.П. Петров. Данный метод, основанный на регистрации и анализе энергетических спектров потоков атомов, выходящих из плазмы, был предложен и разработан в ФТИ им. Иоффе в 1960 г. [13], а первые результаты по применению данного метода были получены на установке “Альфа” [14].

Синтетический сигнал диагностики рассчитывается с помощью связки кодов FIDASIM [15, 16] (первая реализация была написана Ядонг Луо и Биллом Хейдбринком на языке программирования IDL) и NUBEAM [17, 18] (первая версия была написана Р.Дж. Голдстоном).

Данная статья имеет следующую структуру: во втором разделе рассматриваются особенности экспериментальной установки — сферического токамака Глобус-М/М2, в третьем разделе описывается процесс моделирования замедления быстрых частиц и метода его валидации с помощью кода FIDASIM, а четвертый раздел посвящен практическому применению связки кодов NUBEAM и FIDASIM.

2. СХЕМА ВВОДА НАГРЕВНЫХ ПУЧКОВ И ДИАГНОСТИКИ ТОКАМАКА ГЛОБУС-М/М2

Расчеты функций распределения быстрых частиц проводились как для токамака Глобус-М [19], так и для Глобус-М2 [1, 20] — установки с модернизированной электромагнитной системой. После модернизации токамак сохранил вакуумную камеру и геометрические параметры плазменного шнура (большой радиус $R = 0.36$ м, малый радиус $a = 0.24$ м, аспектное отношение $R/a \sim 1.5$ и вытянутость $k \sim 1.8-2$), тороидальное магнитное поле и ток плазмы были существенно увеличены.

Комплекс нейтральной инжекции включает в себя два инжектора атомов высокой энергии. Инжекция как первого (НИ-1), так и второго (НИ-2) пучка атомов высокой энергии осуществляется тангенциально в экваториальной плоскости с прицельным параметром 0.3 м по направлению тока плазмы. Схема ввода пучков в камеру токамака, а также размещение основных диагностик приведено на рис. 1.

Основные входные параметры для вычислений NUBEAM и FIDASIM задаются на основе

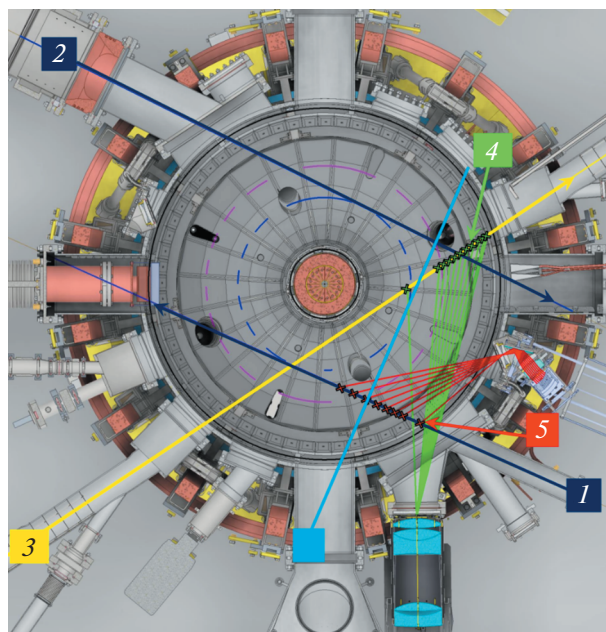


Рис. 1. Экваториальное сечение токамака Глобус-М2: 1 — линия инжекции НИ-1; 2 — линия инжекции НИ-2; 3 — зондирующий луч диагностики томсоновского рассеяния; 4 — хорды наблюдения диагностики томсоновского рассеяния; 5 — хорды наблюдения диагностики активной спектроскопии перезарядки CXRS; 6 — линия наблюдения анализатора атомов перезарядки АКОРД-24М. Синей штриховой линией обозначен прицельный радиус инжекторов, а фиолетовой штриховой линией — положение магнитной оси.

данных диагностического комплекса токамака Глобус-М/М2. К этим параметрам относятся профили электронной температуры и концентрации (измеренные с помощью диагностики томсоновского рассеяния [21, 22]), эффективный заряд (полученный на основе измерений мощности тормозного излучения [23]), магнитная конфигурация (определяется с помощью кода EFIT [24]), ионная температура (измеряется методом активной спектроскопии перезарядки – CXRS [25–27] и анализатором атомов перезарядки АКОРД-24М [28], также используем для измерения энергетического распределения быстрых ионов [29]). Регистрация частиц анализатором атомов осуществляется из узкого конуса со средним прицельным радиусом ~ 30 см, направленным против тока, что позволяет регистрировать преимущественно частицы, летящие по току с питч углом примерно 45° . Диагностика позволяет измерять поток атомов как дейтерия, так и водорода. Максимальная энергия регистрируемых частиц ограничена уровнем ~ 33 кэВ, временное разрешение до 0.1 мс.

Для расчетов сигнала NPA были выбраны ряды с магнитной конфигурацией плазмы с нижней X-точкой, тороидальным магнитным полем B_T от 0.4 Тл до 0.8 Тл, током плазмы I_p от 0.2 до 0.4 МА, с инжекцией дейтериевого или водородного пучка атомов мощностью от 0.3 до 0.9 МВт с энергией частиц E_b от 20 до 45 кэВ.

3. РАСЧЕТ СИНТЕТИЧЕСКОГО СИГНАЛА АТОМОВ ПЕРЕЗАРЯДКИ СВЯЗКОЙ NUBEAM/FIDASIM

Моделирование функции распределения быстрых частиц производится с помощью кода NUBEAM, который на первом этапе осуществляет расчет перезарядки нейтральных атомов пучка на плазме методом Монте-Карло, вычисляя, таким образом, координаты рожденных быстрых частиц, а также плотность нейтральных атомов пучка и гало. На втором этапе код рассчитывает замедление быстрых частиц в приближении ведущих центров. Для сферических токамаков использовать такое приближение можно только с поправкой на конечность ларморовского радиуса с учетом разницы магнитного поля внутри орбиты быстрой частицы [17, 18]. Вычисления с данной поправкой требуют больших ресурсов, но более простое приближение для моделирования в сферических токамаках неприменимо из-за сильной вариации тороидального и полоидального магнитного поля. Входные данные для вычислительного кода NUBEAM, следующие: температура и концентрация электронов и ионов, плотность нейтральных частиц, рождающихся в результате газонапуска, геометрия плазмы и маг-

нитного поля, мощность, энергия и координаты пучка.

Сильное влияние на функцию распределения быстрых частиц в токамаке Глобус-М/М2 имеют потери надтепловых ионов, в частности, на первой орбите, которые происходят, когда ион попадает на неудерживаемую орбиту и сталкивается со стенкой [17, 18]. Большой вклад в потери также вносит реакция перезарядки быстрых частиц на атомах фоновой плазмы. Из-за близости плазмы к стенкам камеры (в Глобус-М2 зазор плазматенка не превышает 5 см) нейтральные частицы могут глубоко проникать внутрь плазмы и оказывать сильное воздействие на удержание быстрых частиц. Распределение атомов в плазме рассчитывалось с помощью кода DOUBLE [30]. Абсолютное значение концентрации нейтралов было получено через сравнение расчетных и измеренных анализатором спектров в области низких энергий. Полученный профиль концентрации закладывался в расчет кодом NUBEAM.

Для получения синтетического сигнала анализатора атомов перезарядки используется код FIDASIM [15, 16], входные данные для которого берутся напрямую из NUBEAM – температура и концентрация электронов и ионов, плотность нейтральных частиц от газонапуска, геометрия плазмы и магнитного поля, мощность, энергия и координаты пучка, а также функция распределения быстрых частиц в виде $F(R, Z, E, p)$, где R, Z – пространственные цилиндрические координаты, E – энергия, p – косинус питч угла, представляющий собой отношение скорости вдоль магнитного поля к полной скорости.

Сигнал, регистрируемый анализатором атомов перезарядки, может иметь активную и пассивную составляющие [29]. Пассивный сигнал – это поток частиц, выходящих из плазмы за счет реакции перезарядки быстрых ионов на фоновых нейтральных атомах, проникающих в плазму в результате проникновения их из пристеночной области, а также в результате рекомбинации. Активный сигнал – поток частиц, возникающих из-за процесса перезарядки надтепловых ионов на атомах пучка и гало.

Процесс моделирования сигнала анализатора атомов перезарядки по заданной функции распределения быстрых частиц можно разделить на три последовательных этапа. Первый этап – расчет плотности нейтральных частиц, которые поступают от инжектора для каждого типа частиц с различными энергиями: полной энергией инжекции E_b , половиной $E_b/2$ и одной третьей $E_b/3$. На втором этапе с помощью излучательно-столкновительной модели происходит вычисление плотности гало-атомов, возникающих из-за взаимодействия тепловой плазмы с нейтральными частицами пучка. Третий этап – вычисление потока

атомов, падающего на анализатор атомов перезарядки. Вычисление потока сводится к расчету интеграла [13, 14]

$$\Phi(E_i) = \int F(R, Z, E, p) n_n(R, Z) \times \times \sigma_{cx}(E_{rel}^{i,n}) V_{rel}^{i,n} e^{-\lambda} \frac{\Omega S}{4\pi} dl, \quad (1)$$

где $F(R, Z, E, p)$ [$\text{м}^{-3} \cdot \text{ср}^{-1} \cdot \text{эВ}^{-1}$] – функция распределения быстрых частиц, n_n – концентрация нейтральных частиц, σ_{cx} – сечение реакции перезарядки, $V_{rel}^{i,n}$ – относительная скорость между нейтральной n и быстрой частицами i , а $E_{rel}^{i,n}$ – соответствующая относительная энергия, $e^{-\lambda}$ – коэффициент, отвечающий за ослабление потока нейтральных частиц, выходящих из плазмы ΩS – произведение телесного угла, определяемого апертурой анализатора и расстоянием до него, S – видимая анализатором площадь плазмы, dl – дифференциал расстояния вдоль линии наблюдения анализатора. Данный интеграл может быть рассчитан как аналитически, так и методом Монте-Карло. В данной работе применяется второй вариант.

4. ПРИМЕНЕНИЕ КОДОВ NUBEAM/FIDASIM В ЭКСПЕРИМЕНТАХ НА СФЕРИЧЕСКИХ ТОКАМАКАХ ГЛОБУС-М/М2

Функция распределения быстрых частиц была получена с помощью измерений NPA и вычислений синтетического сигнала кодом FIDASIM и кодом NUBEAM для двух групп экспериментов на сферическом токамаке Глобус-М/М2. Первая группа – при низкой МГД-активности и при низких потерях быстрых ионов, где не требуется ввод коэффициента аномальной диффузии и процесс замедления быстрых частиц описывается классическими механизмами, что подходит для простой первоначальной проверки связки кодов и используемых приближений. Во второй группе экспериментов проводится проверка применимости ввода коэффициента аномальной диффузии для описания экспериментов с высокой активностью МГД-неустойчивостей, приводящих к существенным потерям надтепловых ионов. Также, во второй группе экспериментов проводится вычисление влияния неустойчивостей на поглощенную плазмой мощность инжектируемого пучка высокоэнергетичных атомов.

4.1. Эксперименты без потерь быстрых частиц от МГД-неустойчивостей

Разряды #32994 и #33008 проведены на токамаке Глобус-М при тороидальном магнитном

поле $B_T = 0.4$ Тл, токе плазмы $I_p = 200$ кА, коэффициент запаса устойчивости $q_{95} = 5$ (согласно реконструкции равновесия кодом EFIT). Инжекция (НИ-1) нейтрального пучка водорода осуществлялась с 150 по 180 мс разряда, энергия инжекции составляет $E_b = 18$ кэВ, мощность в разряде #32994 $P_b = 300$ кВт, а в разряде #33008 – $P_b = 275$ кВт. Как видно на осциллограммах сигнала зонда Мирнова и мягкого рентгеновского излучения (рис. 2а), отсутствуют неустойчивости, приводящие к высоким потерям быстрых частиц – пилообразные и Альфвеновские колебания. При этом время замедления быстрых частиц примерно равно 16 мс, что намного выше периода пилообразных колебаний. Данные разряды интересны, прежде всего, классическим поведением быстрых частиц, что позволяет проверить возможность применения кода NUBEAM для сферического токамака Глобус-М.

В исследуемых разрядах различается положение плазменного шнура – в разряде #33008 плазма смещена внутрь и имеет большой радиус 35 см, а в разряде #32994 – 37 см (рис. 2б).

Полученный в результате моделирования разрядов #32994 и #33008 (рис. 3а) спектр атомов, рассчитанный кодом FIDASIM, хорошо совпадает со спектром, полученным экспериментально. А из-за смещения внутрь большая часть плазмы в разряде #33008 оказалась в области повышенного тороидального магнитного поля, что привело к снижению орбитальных потерь быстрых частиц в сравнении с несмещенным разрядом #32994 (рис. 4а).

Таким образом, моделирование разрядов с низкой МГД-активностью показало возможность применения связки кодов NUBEAM и FIDASIM для моделирования процесса замедления быстрых частиц на токамаке Глобус-М.

4.2. Эксперименты с пилообразными колебаниями

Разряд #37067 проведен на токамаке Глобус-М при увеличенных (в сравнении с предыдущим случаем) параметрах: тороидальное магнитное поле повышено до $B_T = 0.5$ Тл, ток плазмы – до $I_p = 225$ кА, коэффициент запаса устойчивости $q_{95} = 5$. Инжекция (НИ-1) дейтерия осуществлялась с 150 по 180 мс, энергия частиц $E_b = 26$ кэВ, мощность инжекции $P_b = 650$ кВт. Повышение магнитного поля приводит к уменьшению классических потерь быстрых частиц. Одновременно с этим, как видно из рис. 5, на осциллограммах сигналов зонда Мирнова и мягкого рентгеновского излучения наблюдаются развитые МГД-колебания, которые могут приводить к значительным потерям быстрых частиц.

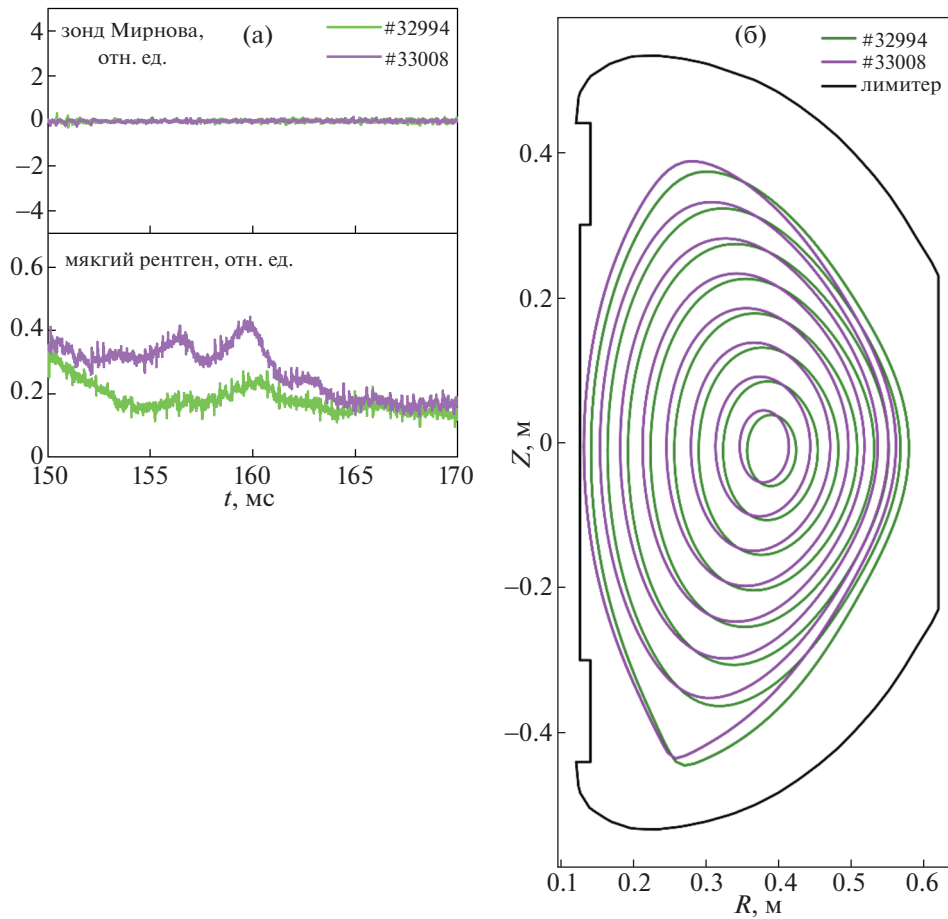


Рис. 2. Осциллограммы сигнала зонда Мирнова и датчика мягкого рентгена в разрядах с низкой МГД-активностью: #32994 и #33008 ($B_T = 0.4$ Тл, $I_p = 200$ кА) (а); магнитная конфигурация плазмы для разрядов #32994 и #33008, последний смещен внутрь в сторону сильного магнитного поля на 2 см (б).

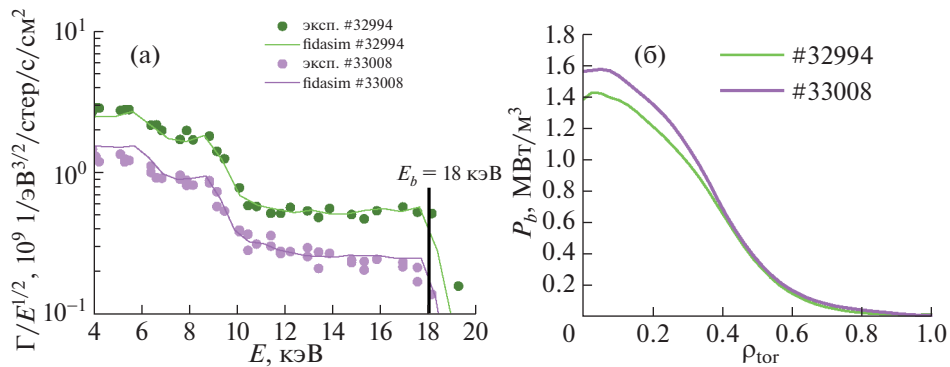


Рис. 3. Сравнение экспериментального и синтетического сигнала анализатора атомов перезарядки для разрядов без МГД-неустойчивостей #32994 и #33008 ($B_T = 0.4$ Тл, $I_p = 200$ кА) (а); зависимость плотности поглощенной мощности от $\rho_{tor} = (\Phi/\Phi_b)^{1/2}$, где Φ – тороидальный магнитный поток, а Φ_b – тороидальный магнитный поток на границе плазмы.

Моделирование удержания быстрых частиц при высокой МГД-активности с учетом только классических потерь дает результат, значительно отличающийся от экспериментальных наблюде-

ний как по абсолютной величине сигнала, так и по форме энергетического спектра. Данные различия не могут быть объяснены неопределенностью значения нейтральной плотности, так как

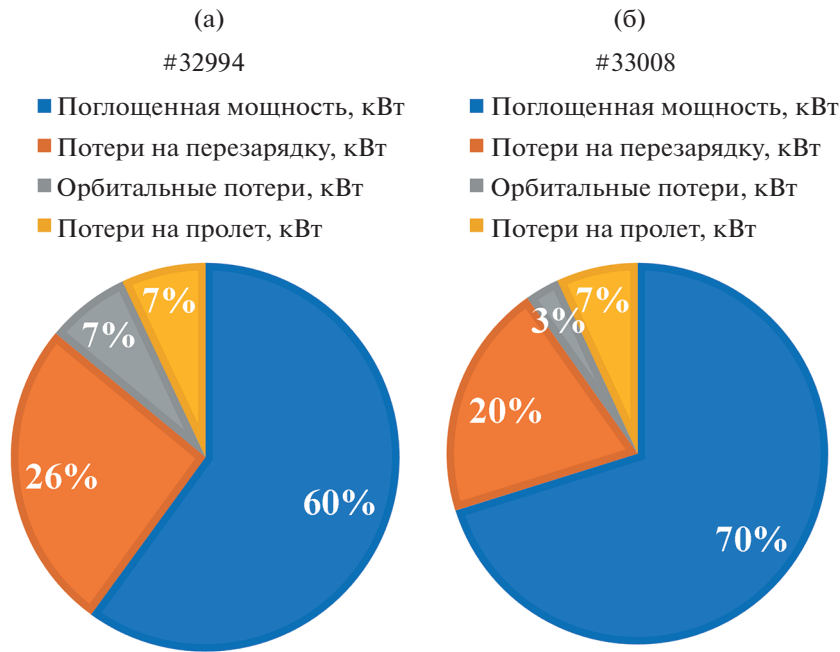


Рис. 4. Баланс мощности при нейтральной инжекции в разрядах без МГД-неустойчивостей #32994 (а) и #33008 (б), $B_T = 0.4$ Тл, $I_p = 200$ кА.

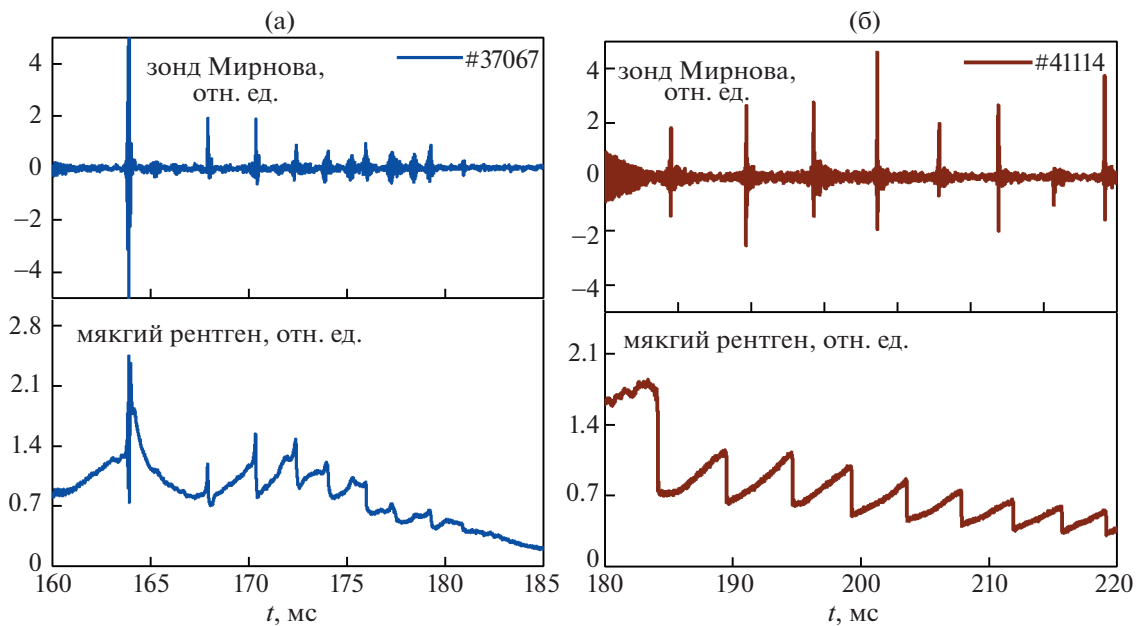


Рис. 5. Осциллограммы сигналов зонда Мирнова и датчика мягкого рентгеновского излучения для разрядов при высокой активности МГД-колебаний #37067 ($B_T = 0.5$ Тл, $I_p = 225$ кА) (а) и #41114 ($B_T = 0.8$ Тл, $I_p = 400$ кА) (б).

продолжают наблюдаться существенные различия экспериментальных данных с рассчитанными даже при изменении плотности атомов на границе плазмы в широких пределах от 10^{17} м⁻³ до

10^{18} м⁻³ (рис. 6а, область, закрашенная голубым цветом).

Учет влияния пилообразных колебаний на удержание быстрых частиц осуществлялся с по-

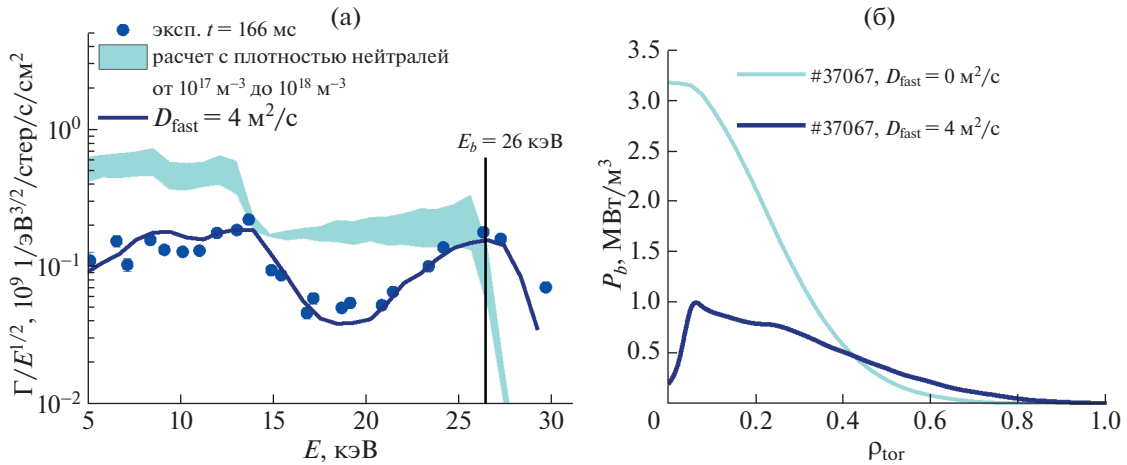


Рис. 6. Поток атомов перезарядки в разряде с МГД-неустойчивостями #37067 ($B_T = 0.5$ Тл, $I_p = 225$ кА) (а), закрашенная область – моделирование связкой кодов NUBEAM/FIDASIM с учетом только классических потерь при плотности нейтральных частиц на границе плазмы от 10^{17} м^{-3} до 10^{18} м^{-3} ; линия – с учетом аномальной диффузии $D_{fast} = 4$ $\text{м}^2/\text{с}$; точки – экспериментальный спектр; плотность поглощенной мощности с учетом коэффициента аномальной диффузии и с учетом только классических потерь (б).

мощью подбора усредненного коэффициента аномальной диффузии D_{fast} , не зависящего от энергии, питч угла и координат частиц. В результате подбора было обнаружено, что синтетический сигнал анализатора атомов перезарядки наилучшим образом совпадает с измеренным при коэффициенте аномальной диффузии $D_{fast} = 4$ $\text{м}^2/\text{с}$ (рис. 6а).

Введение в расчет аномальной диффузии приводит к снижению поглощенной мощности на 36% в сравнении с моделированием, предполагающим классическое удержание (с 226 кВт до 146 кВт, рис. 7). Снижение поглощенной мощности в первую очередь связано с увеличением орбитальных потерь быстрых ионов с 47 кВт до 178 кВт. При этом потери на перезарядку уменьшились по абсолютной величине (с 366 кВт до 275 кВт), поскольку уменьшилось число замедляющихся частиц. Следует также отметить, что в сравнении с разрядами с водородным пучком при низкой МГД-активности, в рассматриваемом эксперименте использовался дейтерий, вследствие этого, потери на пролет снизились с 7 до 3%, из-за уменьшения длины свободного пробега частиц.

Второй разряд – #41114 (подробное описание приведено в работе [3]) получен на модернизированном токамаке Глобус-М2 при еще более высоких параметрах: магнитное поле $B_T = 0.8$ Тл, ток плазмы $I_p = 400$ кА, коэффициент запаса устойчивости $q_{95} = 6.2$. Инжекция водородного пучка осуществлялась новым инжектором (НИ-2) [31] с энергией $E_b = 45$ кэВ и мощностью $P_b = 750$ кВт. Инжекция начиналась на фазе роста тока (130 мс)

и длилась 100 мс. В данном разряде присутствуют интенсивные МГД-колебания, что видно на сигналах зонда Мирнова и мягкого рентгеновского излучения (рис. 5б). Для учета влияния неустойчивостей на удержание быстрых частиц также вводился коэффициент аномальной диффузии.

Наилучшее согласование между измеренным и рассчитанным сигналом анализатора атомов перезарядки в ходе моделирования было получено при введении коэффициента аномальной диффузии $D_{fast} = 1.5$ $\text{м}^2/\text{с}$. Учет увеличенного переноса надтепловых ионов из-за неустойчивостей приводит к снижению поглощенной мощности пучка с 643 до 366 кВт (см. рис. 9). Как и в разряде #37067, снижение поглощенной мощности, по большей части, связано с ростом орбитальных потерь (с 17 до 202 кВт). Несмотря на высокую плотность плазмы, из-за высокой энергии частиц в 45 кэВ и использования водорода в качестве рабочего газа инжектора, потери на пролет составили 26 кВт или 3% от мощности инъекции.

Стоит отметить, что при моделировании разряда #41114 небольшой коэффициент диффузии $D_{fast} = 1.5$ $\text{м}^2/\text{с}$ привел к значительному увеличению потерь мощности на 277 кВт, в то время, как при моделировании разряда #37067 при меньшем поле и токе оказался большим и равным 4 $\text{м}^2/\text{с}$, при этом увеличение потерь не такое большое и равно 80 кВт. Такой эффект увеличения потерь объясняется тем, что в разряде #37067 классические орбитальные потери находятся на достаточно большом уровне и достигают 47 кВт, даже без дополнительного учета потерь из-за аномальной диффузии. При этом как видно из рис. 5а, основ-

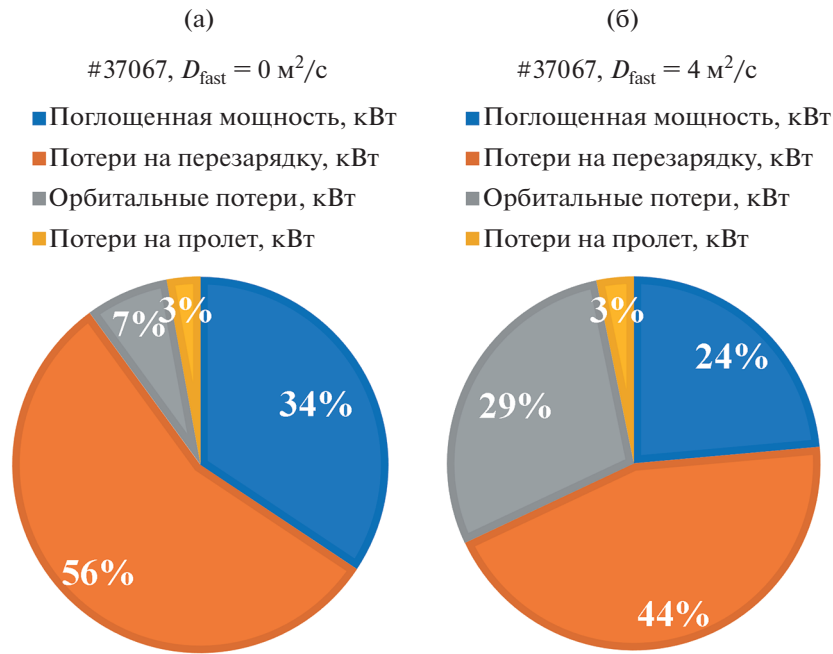


Рис. 7. Баланс мощности при нейтральной инжекции в разряде #37067 с МГД-неустойчивостями ($B_T = 0.5$ Тл, $I_p = 225$ кА): только с учетом классических потерь (а), с учетом аномальной диффузии (б).

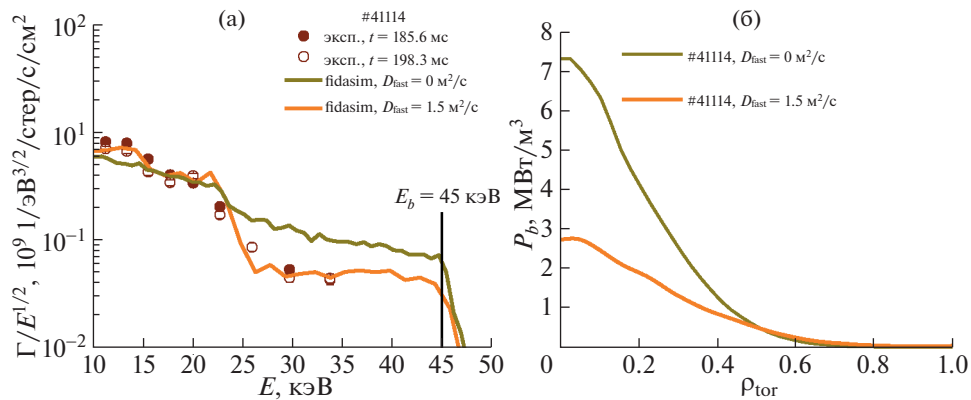


Рис. 8. Потоки атомов перезарядки в разряде с МГД-неустойчивостями #41114 ($B_T = 0.8$ Тл, $I_p = 400$ кА) (а); оранжевая линия – расчет связкой кодов NUBEAM/FIDASIM с аномальной диффузией $D_{fast} = 1.5$ м²/с; коричневая – расчет с учетом только классических потерь, точки – экспериментальный спектр; плотность поглощенной мощности с учетом коэффициента аномальной диффузии и только с учетом классических потерь (б).

ные потери приходится на частицы с полной энергией инжекции 26 кэВ, а для уменьшения и без того малого числа быстрых ионов требуется ввод большого коэффициента аномальной диффузии. В случае увеличения тороидального поля до 0.8 Тл, а тока до 400 кА в разряде #41114 орбитальные потери сильно снижаются до 17 кВт (без учета аномальной диффузии) и ввод небольшой аномальной диффузии приводит к большим потерям мощности.

Таким образом, вычисления синтетического сигнала, проведенные с помощью кодов NUBEAM и FIDASIM, продемонстрировали, что МГД-неустойчивости приводят к увеличению орбитальных потерь быстрых ионов, даже в случае с повышенными параметрами плазмы (0.8 Тл, 400 кА), когда классические потери малы. Одновременно с этим неустойчивости приводят к снижению мощности, поглощенной плазмой в процессе нагрева. Подбор аномальных коэффициентов диффузии в процессе расчетов позволяет



Рис. 9. Баланс мощности при нейтральной инжекции в разряде с МГД-неустойчивостями #41114 ($B_T = 0.8$ Тл, $I_p = 400$ кА): только с учетом классических потерь (а), с учетом аномальной диффузии (б).

количественно согласовать экспериментальные измерения с функцией распределения быстрых ионов и определить поглощенную мощность.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрен метод определения поглощенной мощности пучка с помощью синтетической диагностики сигналов анализатора атомов перезарядки, основанной на связке кодов NUBEAM/FIDASIM. Метод применен в разрядах токамаков Глобус-М/М2 при различных условиях. Результаты сравнения экспериментального и синтетического сигналов показали, что в разрядах с низкой МГД-активностью расчетный сигнал хорошо согласуется с измеренным. Однако при возникновении неустойчивостей, синтетический сигнал начинает значительно превышать измеренный. Такое различие свидетельствует о неклассических потерях быстрых частиц, которые невозможно напрямую рассчитать кодом NUBEAM. Для решения проблемы при расчете функции распределения быстрых частиц вводится аномальный коэффициент диффузии. Подбор коэффициента осуществляется через сравнение экспериментального сигнала анализатора быстрых частиц с синтетическим. Учет диффузии показывает снижение эффективности нагрева плазмы пучком нейтральных атомов до 50%, при этом основным каналом потерь быстрых ионов являются орбитальные потери, возрастающие в несколько раз при наличии МГД-неустойчивостей.

Исследования проведены на УНУ “Сферический токамак Глобус-М”, входящей в состав ФЦКП “Материаловедение и диагностика в передовых технологиях”. Рутинная подготовка нагревных и диагностических систем токамака (раздел 2) выполнена в рамках контракта 0034-2021-0001. Раздел 3 выполнен в рамках контракта 0040-2019-0023. Расчет сигнала анализатора атомов перезарядки в дейтериевой плазме без пилообразных колебаний (раздел 4.1) выполнен при поддержке гранта РНФ 21-72-20007. Расчеты спектров атомов перезарядки плазмы были получены с использованием вычислительных ресурсов суперкомпьютерного центра Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (www.spbstu.ru).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Minaev V.B., Gusev V.K., Sakharov N.V., Varfolomeev V.I., Bakharev N.N., Belyakov V.A., Bondarchuk E.N., Brunkov P.N., Chernyshev F.V., Davydenko V.I., Dyachenko V.V., Kavin A.A., Khitrov S.A., Khromov N.A., Kiselev E.O., Konovalov A.N., Kornev V.A., Kurskiev G.S., Labusov A.N., Melnik A.D., Mineev A.B., Mironov M.I., Miroshnikov I.V., Patrov M.I., Petrov Yu.V., Rozhansky V.A., Saveliev A.N., Senichenkov I.Yu., Shchegolev P.B., Shcherbinin O.N., Shikhovtsev I.V., Sladkomeдова A.D., Solokha V.V., Tanchuk V.N., Telnova A.Yu., Tokarev V.A., Tolstyakov S.Yu., Zhilin E.G. // Nuclear Fusion. 2017. V. 57. P. 06604. <https://doi.org/10.1088/1741-4326/aa69e0>

2. *Kurskiev G.S., Miroshnikov I.V., Sakharov N.V., Gusev V.K., Petrov Yu.V., Minaev V.B., Balachenkov I.M., Bakharev N.N., Chernyshev F.V., Goryainov V.Yu., Kavlin A.A., Khromov N.A., Kiselev E.O., Krikunov S.V., Lobanov K.M., Melnik A.D., Novokhatskii A.N., Filipov S.V., Zhiltsov N.S., Mineev A.B., Mukhin E.E., Patrov M.I., Petrov A.V., Ponomarenko A.M., Solokha V.V., Shulyatiyev K.D., Shchegolev P.B., Skrekel O.M., Telnova A.Yu., Tkachenko E.E., Tukhmeneva E.A., Tokarev V.A., Tolstyakov S.Yu., Varfolomeev V.I., Voronin A.V., Yashin A.Yu., Solovey V.A., Zhilin E.G.* // Nuclear Fusion. 2022. V. 62. P.04002.
3. *Курские Г.С., Сахаров Н.В., Гусев В.К., Минаев В.Б., Мирошников И.В., Петров Ю.В., Тельнова А.Ю., Бахарев Н.Н., Киселев Е.О., Жильцов Н.С., Щеголев П.Б., Балаченков И.М., Варфоломеев В.И., Воронин А.В., Горайнов В.Ю., Дьяченко В.В., Жилин Е.Г., Ильясова М.В., Кавин А.А., Коновалов А.Н., Крикунов С.В., Лобанов К.М., Мельник А.Д., Минеев А.Б., Новохацкий А.Н., Патров М.И., Петров А.В., Пономаренко А.М., Скрекель О.М., Соловей В.А., Солоха В.В., Ткаченко Е.Е., Токарев В.А., Толстяков С.Ю., Тюхменева Е.А., Хилькевич Е.М., Хромов Н.А., Чернышев Ф.В., Шевелев А.Е., Шулятьев К.Д., Яшин А.Ю.* // Физика плазмы. 2023. Т. 49. С. 305.
4. *McNamara S.A.M., Asunta O., Bland J., Buxton P.F., Colgan C., Dnestrovskii A., Gemmel M., Gryaznevich M., Hoffman D., Janky F., Lister J.B., Lowe H.F., Mirfayzi R.S., Naylor G., Nemytov V., Njau J., Pyragius T., Rengle A., Romanelli M., Romero C., Sertoli M., Shevchenko V., Sinha J., Sladkomedova A., Sridhar S., Takase Y., Thomas P., Varje J., Vincent B., Willett H.V., Wood J., Zakhar D., Battaglia D.J., Kaye S.M., Delgado-Aparicio L.F., Maingi R., Mueller D., Podesta M., Delabie E., Lomanowski B., Marchuk O., ST40 Team* // Nuclear Fusion. 2023. V. 63. P. 054002.
5. *Петров Ю.В., Бахарев Н.Н., Буланин В.В., Гусев В.К., Курские Г.С., Мартынов А.А., Медведев С.Ю., Минаев В.Б., Патров М.И., Петров А.В., Сахаров Н.В., Щеголев П.Б., Тельнова А.Ю., Толстяков С.Ю., Яшин А.Ю.* // Физика плазмы. 2011. Т. 37. С. 1075. <https://doi.org/10.1134/S0367292119080080>
6. *Петров Ю.В., Бахарев Н.Н., Гусев В.К., Минаев В.Б., Корнев В.А., Мельник А.Д., Патров М.И., Сахаров Н.В., Толстяков С.Ю., Курские Г.С., Чернышев Ф.В., Щеголев П.Б.* // Письма ЖТФ. 2014. Т. 40. С. 99.
7. *Балаченков И.М., Петров Ю.В., Гусев В.К., Бахарев Н.Н., Буланин В.В., Варфоломеев В.И., Жильцов Н.С., Киселев Е.О., Курские Г.С., Минаев В.Б., Патров М.И., Петров А.В., Пономаренко А.М., Сахаров Н.В., Тельнова А.Ю., Токарев В.А., Хромов Н.А., Щеголев П.Б., Яшин А.Ю.* // Письма ЖТФ. 2020. Т. 46. С. 3. <https://doi.org/10.21883/PJTF.2020.23.50338.1845>
8. *Балаченков И.М., Петров Ю.В., Гусев В.К., Бахарев Н.Н., Варфоломеев В.И., Дьяченко В.В., Коновалов А.Н., Корепанов П.А., Крикунов С.В., Минаев В.Б., Патров М.И., Сахаров Н.В.* // Письма ЖТФ. 2021. Т. 47. С. 17. <https://doi.org/10.21883/PJTF.2021.12.51061.18730>
9. *Petrov Yu.V., Gusev V.K., Sakharov N.V., Minaev V.B., Varfolomeev V.I., Dyachenko V.V., Balachenkov I.M., Bakharev N.N., Bondarchuk E.N., Bulanin V.V., Chernyshev F.V., Iliasova M.V., Kavlin A.A., Khilkevitch E.M., Khromov N.A., Kiselev E.O., Kononov A.N., Kornev V.A., Krikunov S.V., Kurskiev G.S., Melnik A.D., Miroshnikov I.V., Novokhatskii A.N., Zhiltsov N.S., Patrov M.I., Petrov A.V., Ponomarenko A.M., Shulyatiyev K.D., Shchegolev P.B., Shevelev A.E., Skrekel O.M., Telnova A.Yu., Tukhmeneva E.A., Tokarev V.A., Tolstyakov S.Yu., Voronin A.V., Yashin A.Yu., Bagryansky P.A., Zhilin E.G., Goryainov V.A.* // Nuclear Fusion. 2022. V. 62. P. 042009 <https://doi.org/10.1088/1741-4326/ac27c7>
10. *Medvedev S.Y., Martynov A.A., Isaev M.Y., Balachenkov I.M., Bakharev N.N., Petrov Yu.V., Cooper W.A.* // Fusion Sci. Technol. 2022. V. 78. P. 1. <https://doi.org/10.1080/15361055.2022.2066048>
11. *Мельник А.Д., Бахарев Н.Н., Гусев В.К., Гончаров П.Р., Курские Г.С., Минаев В.Б., Петров Ю.В., Сахаров Н.В., Тельнова А.Ю., Толстяков С.Ю., Чернышев Ф.В., Щеголев П.Б.* // Физика плазмы. 2017. Т. 43. С. 651. <https://doi.org/10.7868/S036729211708008X>
12. *Bakharev N.N., Melnik A.D., Chernyshev F.V.* // Atoms. 2023. V. 11. P. 53. <https://doi.org/10.3390/atoms11030053>
13. *Афросимов В.В., Гладковский И.П., Гордеев Ю.С., Калинин И.Ф., Федоренко Н.В.* // ЖТФ. 1960. Т. 30. С. 1456.
14. *Афросимов В.В., Гладковский И.П., Гордеев Ю.С., Калинин И.Ф., Петров М.П., Федоренко Н.В.* // ЖТФ. 1960. Т. 30. С. 1469.
15. *Geiger B., Stagner L., Heidbrink W.W., Dux R., Fischer R., Fujiwara Y., Garcia A.V., Jacobsen A.S., Vuuren A.J., Karpushov A.N., Liu D., Schneider P.A., Sfiligoi I., Poloskei P.Zs., Weiland M.* // Plasma Phys. Control. Fusion. 2020. V. 62. P. 105008. <https://doi.org/10.1088/1361-6587/aba8d7>
16. <https://github.com/D3DEnergetic/FIDASIM>.
17. *Pankin A., McCune D., Andre R., Bateman G., Kritz A.* // Computer Phys. Communications. 2004. V. 159. P. 157.
18. *Bakharev N.N., Chernyshev F.V., Goncharov P.R., Gusev V.K., Ibyaminova A.D., Kornev V.A., Kurskiev G.S., Melnik A.D., Minaev V.B., Mironov M.I., Patrov M.I., Petrov Yu.V., Sakharov N.V., Shchegolev P.B., Tolstyakov S.Yu., Zadviitskiy G.V.* // Nucl. Fusion. 2015. V. 55. P. 1421. <https://doi.org/10.1088/0029-5515/55/4/043023>
19. *Гусев В.К., Голант В.Е., Гусаков Е.З., Дьяченко В.В.И, Ирзак М.А., Минаев В.Б., Мухин Е.Е., Новохацкий А.Н., Подушикова К.А., Раздобарин Г.Т., Сахаров Н.В., Трегубова Е.Н., Узлов В.С., Щербинин О.Н., Беляков В.А., Кавин А.А., Косцов Ю.А., Кузьмин Е.Г., Сойкин В.Ф., Кузнецов Е.А., Ягнов В.А.* // ЖТФ. 1999. Т. 69. С. 58.
20. *Gusev V.K., Bakharev N.N., Belyakov V.A., Ber V.Y., Bondarchuk E.N., Bulanin V.V., Vukov A.S., Chernyshev F.V., Demina E.V., Dyachenko V.V., Goncharov P.R., Gorodetsky A.E., Gusakov E.Z., Ibyaminova A.D., Ivanov A.A., Irzak M.A., Kaveeva E.G., Khitrov S.A., Khokhlov M.V., Khromov N.A., Kolmogorov V.V., Kor-*

- nev V.A., Krasnov S.V., Kurskiev G.S., Labusov A.N., Lepikhov S.A., Litunovsky N.V., Mazul I.V., Melnik A.D., Mikov V.V., Minaev V.B., Mineev A.B., Mironov M.I., Miroshnikov I.V., Mukhin E.E., Novokhatsky A.N., Ovsyannikov A.D., Patrov M.I., Petrov A.V., Petrov Yu.V., Rozhansky V.A., Sakharov N.V., Saveliev A.N., Senichenkov I.Yu., Sergeev V.Yu., Shchegolev P.B., Shcherbinin O.N., Shikhovtsev I.V., Tanaev V.S., Tanchuk V.N., Tolstyakov S.Y., Varfolomeev V.I., Vekshina E.O., Voronin A.V., Voskoboinikov S.P., Wagner F., Yashin A.Y., Zadvitskiy G.V., Zakharov A.P., Zalavutdinov R.K., Zhilin E.G. // *Plasma Phys. Control. Fusion*. 2015. V. 58. P. 014032. <https://doi.org/10.1088/0029-5515/55/10/104016>
21. Курскиеv Г.С., Жильцов Н.С., Коваль А.Н., Корнев А.Ф., Макаров А.М., Мухин Е.Е., Петров Ю.В., Сахаров Н.В., Соловей В.А., Ткаченко Е.Е., Толстяков С.Ю., Чернаков П.В. // *Письма ЖТФ*. 2021. Т. 47. С. 41. <https://doi.org/10.21883/PJTF.2021.24.51799.19019>
 22. Zhiltsov N.S. et al. 2023 provisionally accepted to Nuclear Fusion
 23. Tukhmeneva E.A., Tolstyakov S.Yu., Kurskiev G.S., Gusev V.K., Minaev V.B., Petrov Yu.V., Sakharov N.V., Telnova A.Yu., Bakharev N.N., Shegolev P.B., Kiselev E.O. // *Plasma Sci. Technol.* 2019. V. 21. P. 105104. <https://doi.org/10.1088/2058-6272/ab305f>
 24. Гусев В.К., Бендер С.Е., Деч А.В., Косцов Ю.А., Левин Р.Г., Минеев А.Б., Сахаров Н.В. // *ЖТФ*. 2006. Т. 76. Вып. 8.
 25. Avdeeva G.F., Miroshnikov I.V., Bakharev N.N., Kurskiev G.S., Patrov M.I., Sergeev V.Yu., Schegolev P.B. // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2016. V. 666. P. 012002.
 26. Larionova M.M., Miroshnikov I.V., Gusev V.K., Minaev V.B., Patrov M.I., Petrov Yu.V., Sakharov N.V., Schegolev P.B., Telnova A.Yu., Bakharev N.N. // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2019. V. 1400. P. 077018. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1400/7/077018>
 27. Тельнова А.Ю., Мирошников И.В., Митранкова М.М., Бахарев Н.Н., Гусев В.К., Жильцов Н.С., Киселев Е.О., Курскиеv Г.С., Минаев В.Б., Петров Ю.В., Сахаров Н.В., Шчеголов П.Б., Тюхменева Е.А. // *Письма ЖТФ*. 2021. Т. 47. С. 25. <https://doi.org/10.21883/PJTF.2021.09.50903.18618>
 28. Bakharev N.N., Chernyshev F.V., Gusev V.K., Kiselev E.O., Kurskiev G.S., Larionova M.M., Melnik A.D., Minaev V.B., Mironov M.I., Miroshnikov I.V., Petrov Yu.V., Sakharov N.V., Shchegolev P.B., Skrekel O.M., Telnova A.Yu., Tukhmeneva E.A., Varfolomeev V.I. // *Plasma Phys. Control. Fusion*. 2020. V. 62. P. 125010. <https://doi.org/10.1088/1361-6587/abbe32>
 29. Bakharev N.N., Balachenkov I.M., Chernyshev F.V., Gusev V.K., Kiselev E.O., Kurskiev G.S., Melnik A.D., Minaev V.B., Mironov M.I., Nesenevich V.G., Petrov Y.V., Sakharov N.V., Shchegolev P.B., Skrekel O.M., Telnova A.Y., Tukhmeneva E.A., Varfolomeev V.I. // *Plasma Phys. Control. Fusion*. 2021. V. 63. P. 125036. <https://doi.org/10.1088/1361-6587/ac3497>
 30. Миронов М.И., Чернышев Ф.В., Афанасьев В.И., Мельник А.Д., Наволоцкий А.С., Несенеvич В.Г., Петров М.П., Петров С.Я. // *Физика плазмы*. 2020. Т. 47. С. 29. <https://doi.org/10.31857/S0367292121010108>
 31. Telnova A.Y., Kurskiev G.S., Kiselev E.O., Bakharev N.N., Gusev V.K., Khromov N.A., Medvedev S.Y., Minaev V.B., Miroshnikov I.V., Patrov M.I., Petrov Y.V., Sakharov N.V., Sladkomedova A.D., Shchegolev P.B., Solokha V.V., Tokarev V.A., Tolstyakov S.Y., Tukhmeneva E.A. // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2019. V. 1400. P. 077015. <https://doi.org/10.1088/2058-6272/ab2ff6>