———— ТОКАМАКИ ——

УДК 533.9

# РЕЗУЛЬТАТЫ ПЕРВЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М2<sup>1</sup>

© 2020 г. Н. Н. Бахарев<sup>а,\*</sup>, И. М. Балаченков<sup>a</sup>, В. И. Варфоломеев<sup>a</sup>, А. В. Воронин<sup>a</sup>, В. К. Гусев<sup>a</sup>, В. В. Дьяченко<sup>a</sup>, М. В. Ильясова<sup>a</sup>, Е. О. Киселев<sup>a</sup>, А. Н. Коновалов<sup>a</sup>,
Г. С. Курскиев<sup>a</sup>, А. Д. Мельник<sup>a</sup>, В. Б. Минаев<sup>a</sup>, И. В. Мирошников<sup>a</sup>, А. Н. Новохацкий<sup>a</sup>, М. И. Патров<sup>a</sup>, Ю. В. Петров<sup>a</sup>, Н. В. Сахаров<sup>a</sup>, О. М. Скрекель<sup>a</sup>, А. Ю. Тельнова<sup>a</sup>,
В. А. Токарев<sup>a</sup>, С. Ю. Толстяков<sup>a</sup>, Е. А. Тюхменева<sup>a</sup>, Е. М. Хилькевич<sup>a</sup>, Н. А. Хромов<sup>a</sup>, Ф. В. Чернышев<sup>a</sup>, И. Н. Чугунов<sup>a</sup>, А. Е. Шевелев<sup>a</sup>, П. Б. Щеголев<sup>a</sup>

Поступила в редакцию 19.11.2019 г. После доработки 20.01.2020 г. Принята к публикации 25.01.2020 г.

Новый сферический токамак Глобус-М2, основной особенностью которого является возможность получения тороидального магнитного поля до 1 Тл, был запущен в 2018 г. В статье описаны особенности новой установки, а также основные направления исследований на пути создания гибридного реактора синтез-деление. Основная часть статьи посвящена результатам первой экспериментальной кампании новой установки с тороидальным магнитным полем до 0.73 Тл и током плазмы до 0.33 МА. Достигнуто существенное улучшение параметров разряда по сравнению с предыдущим токамаком Глобус-М. Энергосодержание плазмы возросло до 7 кДж. Рост времени удержания энергии хорошо соответствует предсказаниям, сделанных на основе скейлингов, выведенных для сферических токамаков. Увеличение тороидального магнитного поля и тока плазмы привело к уменьшению потерь быстрых частиц, вызванных тороидальными альфвеновскими модами. Впервые на сферическом токамаке успешно применен метод нижнегибридной генерации тока с помощью ВЧ-волн, возбуждаемых в тороидальном направлении.

*Ключевые слова:* сферический токамак, удержание энергии, нейтральная инжекция, тороидальные альфвеновские моды, нижнегибридная генерация тока

DOI: 10.31857/S036729212007001X

# 1. ВВЕДЕНИЕ

Физический пуск сферического токамака Глобус-M2 [1–3] состоялся в 2018 г. Первая экспериментальная кампания была проведена в 2019 г. Глобус-M2 имеет те же размеры, что и его предшественник – токамак Глобус-М [4, 5] (большой радиус плазмы  $R \approx 36$  см, малый радиус  $a \approx 24$  см, аспектное отношение  $\approx 1.5$ , вытянутость  $\approx 2$ ), однако проект новой установки предполагает двукратное увеличение тороидального магнитного поля  $B_T$  и тока плазмы  $I_p$  до 1 Тл и 500 кА соответственно. Помимо модернизации электромагнитной системы, на токамаке ведется развитие диагностического комплекса, а также систем нагрева и генерации тока. Расположение всех систем и диагностик вокруг токамака показано на рис. 1.

Второй инжектор, позволяющий инжектировать 1 МВт пучок атомов с энергией 50 кэВ, установлен в экспериментальном зале. Проводится замена источников питания систем ионного циклотронного резонансного нагрева (ИЦРН) и нижнегибридной (НГ) генерации тока. Изготовлена новая двупетлевая антенна для ИЦРН. Диагностический комплекс токамака Глобус-М2 существенно расширился. Установлен одноканальный дисперсионный лазерный интерферометр. Анализатор атомов перезарядки АКОРД-12 [6] оснащен подвижной платформой, позволяющей изменять направление линии наблюдения в горизонтальной и вертикальной плоскостях в перерыве между разрядами токамака. Установлена система из двух нейтронных спектрометров, основанных на жидком сцинтилляторе ВС501А. Внедрена новая оптическая система для диагностики эффективного заряда плазмы  $Z_{eff}$  [7]. Полупроводниковые фотодиоды были заменены на

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Статья основана на докладе "Globus-M2 Experiments in Scope of Fusion-Fission Reactor Development", представленном на конференции ААРР 2019.



**Рис. 1.** Расположение диагностик и систем дополнительного нагрева плазмы вокруг токамака. 1 - инжектор атомов (18–40 кэВ). 2 - инжектор атомов (40–50 кэВ). 3 - ИЦР антенна. 4 - антенна типа грилл. 5 - многоканальный доплеровский рефлектометр, 6 - радиометр. 7 - диагностика активной спектроскопии перезарядки. 8 - диверторные зонды Ленгмюра. 9 - система сбора света диагностики томсоновского рассеяния. 10 - система газонапуска. 11 - многоканальный детектор SPD. 12 - система откачки. 13 - многоканальный детектор мягкого рентгена. 14 - набор детекторов SPD. 15 - сканирующий анализатор атомов перезарядки АКОРД-12. 16 - диагностика  $D_{\alpha}$ . 17 - сканирующий анализатор атомов перезарядки АКОРД-12. 16 - диагностика  $D_{\alpha}$ . 17 - сканирующий анализатор атомов перезарядки AКОРД-12. 16 - диагностика  $D_{\alpha}$ . 17 - сканирующий анализатор атомов перезарядки AКОРД-12. 16 - диагностика  $D_{\alpha}$ . 17 - сканирующий анализатор атомов перезарядки AКОРД-34М. 18 - набор  $2 \times 24$  детекторов SPD. 19 - диверторная диагностика томсонов-ского рассеяния. 20 - лазерный интерферометр. 21 - инфракрасная камера. 22 - зондирующий лазер системы томсоновского рассеяния. 23 - диагностика резонансной флуоресценции. 24 - плазменная пушка. 25 - подвижный зонд Ленгмюра. 26 - микроволновый интерферометр. 27 - нейтронный спектрометр. 28 - детекторы нейтронов. 29 - матрица SPD 16x16. 30 - видеокамера. 34 - диагностика спектроскопии. 35 - диагностика мягкого рентгена. 36 - "прыгающи" зонд Ленгмюра. 37 - юстировочная штанга диагностики томсоновского рассеяния. 38 - ловушка лазерного интерферометр. 34 - диагностики спектроскопии. 35 - диагностика мягкого рентгена. 36 - "прыгающи" зонд Ленгмюра. 37 - юстировочная штанга диагностики томсоновского рассеяния. 38 - ловушка лазерного излучения. 39 - диагностика эффективного заряда. 40 - полоидальные магнитные зонды. Диагностики 17, 36 находятся на завершающем этапе разработки.

лавинные фотодиоды, обладающими более подходящей спектральной чувствительностью, благодаря чему увеличилась точность измерения тормозного излучения.

В ближайшее время число каналов доплеровского интерферометра [8] будет увеличено с 4 до 8. Диагностика томсоновского рассеяния будет расширена на пять пространственных точек наблюдения, что позволит проводить детальные измерения электронной плотности и температуры на внешней границе плазмы. Число пространственных каналов диагностики активной спектроскопии перезарядки [9] будет увеличено с 2 до 7. В то же время ведется разработка новых диагностик. "Прыгающий" зонд [10] изготовлен и подготовлен к установке на токамак. Он позволяет осуществлять измерения параметров граничной плазмы до четырех раз в течение разряда и оснащен 9-штырьковой головкой, обеспечивающей измерение плавающего потенциала, ионного тока насыщения, электронной температуры  $T_e$ , электронной плотности  $n_e$  и параллельного числа Маха. Пятиканальная диагностика томсоновского рассеяния дивертора находится на завершающем этапе разработки. Создана сканирующая платформа для анализатора атомов перезарядки АКОРД-24М.

Основной целью реконструкции токамака Глобус-М является достижение параметров плазмы, близких к планируемым в компактном сферическом токамаке – источнике нейтронов, используемом в качестве драйвера в гибридном реакторе синтез-деление. Новые экспериментальные условия токамака Глобус-М2 обладают рядом особенностей: низкая столкновительность (безразмерная столкновительность  $v^* = 0.005 -$ 0.015), высокая удельная мощность нагрева  $(P_{heat}/V \text{ до 6 MBt/m}^3)$ , увеличенная длительность разряда (до 1 с) и анизотропная плазма (отношение давления быстрых частиц к полному давлению плазмы до 30%). На токамаке Глобус-М2 будут продолжены исследования, начатые на токамаке Глобус-М, по направлениям, связанным с разработкой источника нейтронов синтеза: дополнительный нагрев с помощью нейтральной инжекции (НИ) [11] и ИЦРН [12]; генерация токов увлечения [4] с помощью НГ волн высокой частоты (ВЧ) [13] и генерация токов увлечения пучком атомов высокой энергии [14]; удержание энергии [15–18]; изотопный эффект [2]; удержание быстрых частиц [19-22]; безындукционный старт разряда [23]; физика плазмы дивертора и обдирочного слоя [24, 25]; исследования материалов [26]; транспорт примесей [27]; подача топлива в разряд с помощью плазменной пушки [28]; срывы плазмы [29].

В статье рассматриваются основные результаты первой экспериментальной кампании нового токамака Глобус-М2, актуальные для проектирования и создания компактного источника нейтронов на основе сферического токамака: удержание энергии, влияние тороидальных альфвеновских мод на удержание быстрых частиц и генерация тока с помощью НГ ВЧ-волн. В течение кампании изучалась омическая плазма и плазма с дополнительным нагревом. Тороидальное магнитное поле достигало 0.73 Тл, а ток плазмы – 0.33 МА. Увеличение тороидального магнитного поля и тока плазмы привело к общему улучшению параметров разряда: к росту его длительности, запасенной энергии плазмы, а также ионной и электронной температуры. Помимо этого наблюдался существенный рост нейтронного выхода, что отображено на рис. 2, где показана временная эволюция потока нейтронов в разрядах #37923 (0.73 Тл) и #37929 (0.5 Тл).

## 2. УДЕРЖАНИЕ ЭНЕРГИИ

Одна из наиболее важных тем исследований на сферических токамаках — зависимость времени удержания энергии  $\tau_E$  от  $B_T$ . Эксперименты на токамаках MAST [30], NSTX [31] и Глобус-М [16] показали, что в режиме улучшенного удержания время  $\tau_E \sim B_T^{1.4}$ ,  $\sim B_T^{1.08}$  и  $\sim B_T^{1.28}$  соответственно.



Рис. 2. Временная эволюция нейтронного потока в разрядах № 37923 (0.73 Тл) и № 37929 (0.5 Тл).

Эти зависимости существенно отличаются от классического скейлинга IPB98(у,2):  $\tau_E \sim B_T^{0.15}$  [32]. Данные со сферических токамаков получены при значении  $B_T \leq 0.55$  Тл, поэтому для экстраполяции скейлингов в область, соответствующую параметрам будущих источников нейтронов, важно расширить диапазон экспериментальных параметров, используемых при выводе скейлингов.

В первых экспериментах на токамаке Глобус-М2 с тороидальным магнитным полем и током плазмы, увеличенными до 0.73 Тл и 0.3 МА соответственно, энергосодержание плазмы определялось на основе диамагнитных измерений. Зависимости энергосодержания плазмы от ее плотности в токамаках Глобус-М [33] и Глобус-М2 показаны на рис. 3. Из рисунка видно, что максимальное значение энергозапаса плазмы в токамаке Глобус-М2 достигает 7 кДж. Энергосодержание плазмы в экспериментах на токамаке Глобус-М с тороидальным магнитным полем 0.5 Тл составляло 3.5 кДж, а в экспериментах с тороидальным магнитным полем 0.4 Тл достигало 2.5 кДж.

Для того чтобы проиллюстрировать влияние увеличения тороидального магнитного поля и тока плазмы на параметры плазмы, рассмотрены два разряда с одинаковой среднехордовой плотностью ( $\langle n_e \rangle = 6 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$ ), но разными значениями  $B_T$  на квазистационарной стадии разряда (0.73 Тл – #37893 и 0.4 Тл – #31027). Основные параметры этих разрядов приведены в табл. 1. Временная эволюция энергозапаса плазмы, полученная на основе данных диамагнитных измерений, показана на рис. 4а. В новом токамаке энергосодержание выросло с 2.5 до 7 кДж, а длительность разряда увеличилась со 170 до 200 мс. Данные диамагнитных измерений находятся в хорошем соответствии с результатами кинетических изме-



**Рис. 3.** Зависимость полной запасенной плазмой энергии от ее среднехордовой плотности при различных значениях  $B_T$  и  $I_p$  для токамаков Глобус-М и Глобус-М2.

рений, которые также представлены на рис. 4а. Центральная электронная температура плазмы (рис. 4б) возросла с 450 эВ до 900 эВ при одинаковом значении ее среднехордовой плотности (рис. 4в). Также увеличилась среднехордовая ионная температура, измеренная с помощью анализатора атомов перезарядки (рис. 4г).

Оценка времени удержания энергии, выполненная на основе диамагнитных измерений, была сопоставлена с  $\tau_E$ , прогнозируемыми различными скейлингами. Поглощенная мощность пучка  $P_{abs}$  была оценена с помощью трехмерного алгоритма, рассчитывающего орбиты быстрых частиц [21], и составляла 0.15 МВт в разрядах с тороидальным магнитным полем 0.4 Тл и 0.4 МВт в разрядах с  $B_T = 0.73$  Тл. На рис. 4д изображено время удержании энергии в соответствующих разрядах. Сравнение величин энергосодержания плазмы со значениями, предсказываемыми скейлингами, проводилось на стадии насыщения энергозапаса для моментов времени разрядов с одинаковой плотностью. На токамаке Глобус-М время  $\tau_E \approx$ ≈ 5 мс, а на токамаке Глобус-М2  $\tau_E \approx 9$  мс. Таким образом, при увеличении тороидального магнитного поля на 75% и тока плазмы на 50%, значение

Таблица 1. Основные параметры разрядов № 31027 (Глобус-М) и № 37893 (Глобус-М2)

Номер разряда	31027	37893
<i>В<sub>Т</sub></i> , Тл	0.4	0.7
<i>I<sub>P</sub></i> , MA	0.2	0.3
Инжектированные атомы	D	D
<i>Е<sub>NBI</sub></i> , кэВ	26	28
<i>Р<sub>NBI</sub></i> , МВт	0.7	0.85
<i>t<sub>NBI_start</sub></i> , MC	150	160

времени удержания энергии выросло на 85%, в то время как рост  $\tau_E$ , предсказываемый скейлингом IPB98(у,2) [32], составляет всего 25%. Экспериментальные результаты соответствуют росту значения  $H_{98y2}$ -фактора (отношения  $\tau_E \kappa \tau_E^{IPB98(y,2)}$ ) с 0.8 до 1.1. Отметим также, что максимальное значение  $H_{98y2}$ -фактора, достигнутое на токамаке Глобус-М2, составляет 1.2. Скейлинг NSTX [31] предсказывает рост  $\tau_E$  на 80%, что близко к результатам, полученным в экспериментах на Глобусе-M2. Скейлинги для токамаков Глобус-М [16] и MAST [30] предсказывают увеличение  $\tau_E$  на 95– 100%, что соответствует  $\tau_E^{GLB} \approx 10$  мс для разрядов с тороидальным магнитным полем 0.73 Тл и немного превосходит значения, полученные в экс-

много превосходит значения, полученные в экспериментах. Исследования в данном направлении будут продолжены во время ближайшей экспериментальной кампании на токамаке Глобус-М2.

### 3. АЛЬФВЕНОВСКИЕ МОДЫ

Существование в плазме быстрых частиц со скоростями. превышающими альфвеновские скорости, может приводить к возбуждению одноименных колебаний, вызывающих радиальный транспорт быстрых частиц и, как следствие, дополнительную нагрузку на внутрикамерные компоненты. Даже если альфвеновские неустойчивости не приводят к потерям быстрых частиц, а вызывают только их перераспределение по скоростям, транспорт частиц к граничным областям плазмы с более низкими температурами приведет к уменьшению времени замедления частиц высокой энергии. Поскольку существенная часть нейтронного потока в компактном источнике нейтронов будет связана с взаимодействием быстрых частиц с тепловой плазмой. уменьшение времени замедления быстрых частиц приведет к падению их концентрации и, как следствие, к уменьшению нейтронного выхода.

Увеличение тороидального магнитного поля и тока плазмы в токамаке Глобус-М2 позволило провести новые исследования альфвеновских мод. В рассматриваемой серии экспериментов применялся дополнительный нагрев плазмы с помощью пучка атомов дейтерия с энергией 28 кэВ на стадии роста тока. Мощность инжекции составляла 850 кВт, тороидальное магнитное поле достигало 0.6 Тл, а ток плазмы – 330 кА. В предыдущих экспериментах [21] изучалась зависимость величины потерь быстрых частии при вспышках тороидальных альфвеновских мод от амплитуды вспышки при разных значениях тока плазмы и тороидального магнитного поля. Было показано, что потери падают с увеличением обоих параметров, при этом большее влияние оказывало изменение тока плазмы. Этот эффект связан с тем, что тороидальное магнитное поле влияет на



Рис. 4. Временная эволюция основных параметров плазмы в разряде № 31207 ( $B_T = 0.4$  Тл,  $I_p = 200$  кА) и № 37893 ( $B_T = 0.73$  Тл,  $I_p = 300$  кА). а) – полная запасенная плазмой энергия, рассчитанная на основе диамагнитных (квадраты и круги) и кинетических (кресты) измерений; б) – электронная температура в центре плазмы; в) – среднехордовая плотность плазмы; г) – ионная температура плазмы; д) – время удержания энергии.

ларморовский радиус быстрого вращения частицы, в то время как изменение тока плазмы – на ширину орбиты, которая в несколько раз больше радиуса быстрого ларморовского вращения. В рассматриваемой серии экспериментов диапазон тороидальных магнитных полей и токов плазмы был расширен. На рис. 5 показана зависимость величины провалов на сигнале потоков атомов перезарядки с энергией 28.5 ± 2 кэВ (вблизи энергии инжекции), измеренных с помощью анализаторов атомов перезарядки, от интенсивности вспышек альфвеновских мод. Возмущение полоидального магнитного поля  $\delta B_{\theta}$  определялось с помощью магнитных зондов, расположенных на стенке вакуумной камеры со стороны слабого магнитного поля. На рисунке отображены данные для трех комбинаций тороидального магнитного поля и тока плазмы с одинаковым коэффициентом запаса устойчивости:  $I_p = 180$  кА,  $B_T = 0.4$  Тл;  $I_p = 240$  кА,  $B_T = 0.5$  Тл и  $I_p = 300$  кА,  $B_T = 0.6$  Тл. Новые данные для более широкого диапазона экспериментальных значений  $B_T$  и  $I_p$ подтверждают полученные ранее зависимости: наблюдается уменьшение потерь быстрых частиц при росте тороидального магнитного поля и тока плазмы. Это позволяет надеяться на дальнейшее уменьшение потерь быстрых частиц, вызванных альфвеновскими колебаниями, в сферических токамаках следующего поколения с более высокими значениями тороидального магнитного поля и тока плазмы.

#### 4. НИЖНЕГИБРИДНАЯ ГЕНЕРАЦИЯ ТОКОВ УВЛЕЧЕНИЯ

Создание дополнительных неиндукционных токов в токамаке необходимо для стационарной работы будущего источника нейтронов. Генерация нижнегибриджных токов увлечения является одним из возможных способов поддержания стационарного тока установки. Высокая эффективность данного метода была теоретически предсказана и экспериментально подтверждена на



Рис. 5. Зависимость величины провала на диаграмме потока атомов перезарядки с энергией 28.5 кэВ (близких к энергии инжекции) от интенсивности тороидальных альфвеновских мод для различных  $I_p$  и  $B_T$ .

многих классических токамаках [34, 35]. Единственный сферический токамак, на котором применяли данный метод, — токамак Глобус-М [13]. Метод основан на бесстолкновительной передаче импульса и энергии от НГ-волны частицам плазмы посредством затухания Ландау. Для эффективной НГ-генерации в центре плазмы продольный показатель преломления волны должен отвечать условию доступности, которое для высоких

частот ( $\omega^2 \gg \omega_{pi}^2, \omega_{Be}\omega_{Bi}$ ) принимает форму

$$N_{\parallel} > N_{\parallel cr} = \omega_{pe0} / \omega_{Be} + [1 + (\omega_{pe0} / \omega_{Be})^2]^{1/2},$$

где  $\omega_{pi}$  — ионная плазменная частота,  $\omega_{pe0}$  — плазменная частота в центре плазмы,  $\omega_{Be}$ ,  $\omega_{Bi}$  — электронная и ионная циклотронные частоты соответственно.

НГ-волны, отвечающие данному критерию, как правило, возбуждаются с помощью антенны типа грилл, состоящей из нескольких волноводов, скомпонованных в горизонтальный ряд таким образом, чтобы электрическое поле (основной моды TE<sub>10</sub>) в волноводе было направлено в тороидальном направлении. Токамак Глобус-М работал при высоких значениях плотности плазмы и относительно низких тороидальных магнитных полях, так что всегда выполнялось неравенство  $\omega_{pe} \gg \omega_{Be}$ . В таких условиях стандартный подход к НГ-генерации токов увлечения, разработанный для классических токамаков, неприменим, поскольку в центральную часть плазмы могут попасть только волны с высоким значением продольного показателя преломления  $N_{||} \approx 10$ . Из-за этого на токамаке Глобус-М применялось полоидальное замедление ВЧ-волн [36]. В экспериментах удалось достигнуть генерации тока 20-30 кА при вводимой мощности порядка 100 кВт.

В токамаке Глобус-М2 благодаря более высоким значениям тороидального магнитного поля стало возможным применение классического подхода с тороидальным замедлением волн. Эксперименты по НГ-генерации тока увлечения проводились при  $B_T \approx 0.7$  Тл,  $\langle n_e \rangle \approx 0.5 \times 10^{13}$  см<sup>-3</sup>,  $I_p \approx 200$  кА,  $\langle T_e \rangle \approx 450$  эВ. Электронная температура не изменялась после старта импульса ВЧ-мощности. Длительность генерации ВЧ-волн варьировалась от 25 до 30 мс, а вводимая мощность составляла примерно 180 кВт. В экспериментах использовалась антенна типа грилл с 10 горизонтально скомпонованными волноводами сечением 90 × 10 мм. Толшина стенки между волноводами – 2 мм; сдвиг фаз между соседними волноводами — 120° для спектра продольных замедлений с пиком  $N_{||} = 3$ . На рис. 6 показана эволюция тока плазмы и напряжения на обходе в разряде #37962, где использовалась генерация токов увлечения тороидально замедленными НГ-волнами. В экспериментах наблюдали падение напряжения на обходе плазмы *dU/U* ~ 30% при поддержании тока плазмы на постоянном уровне с помощью системы обратной связи, что при неизменной электронной температуре свидетельствует о существенной генерации токов увлечения величиной до 50-60 кА. При этом оценочная величина бутстреп тока не превышала 4%. Эффективность генерации токов увлечения можно оценить как

$$\eta = \frac{\Delta U}{U} \frac{I_p R n_e}{P_{RF}} \approx 0.1 \times 10^{19} \,\mathrm{A \cdot m^{-2} \cdot Bt^{-1}}.$$

# 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Первая экспериментальная кампания на токамаке Глобус-М2, проведенная в 2019 г., была посвящена исследованию времени удержания энергии, влияния альфвеновских мод на удержание быстрых частиц и НГ-генерации токов увлечения в новых условиях: при тороидальном магнитном поле до 0.73 Тл и токе плазмы до 330 кА. Увеличение  $B_T$  и  $I_n$  привело к существенному росту нейтронного выхода, длительности разряда, энергосодержания плазмы, электронной и ионной температуры. Значение времени удержания энергии превзошло величину, предсказываемую скейлингом IPB98(y,2), а его зависимость от  $B_T$  и  $I_p$  хорошо описывалось скейлингами, полученными для сферических токамаков. Исследование влияния тороидальных альфвеновских мод на удержание быстрых частиц показало, что их потери падают при увеличении тороидального магнитного поля и тока плазмы. Впервые на сферическом токамаке успешно использована нижнегибридная генерация тока с помощью ВЧ-волн, возбуждаемых в тороидальном направлении. В будущих экспериментах планируется планомерное увеличение  $B_T$ и І<sub>р</sub> вплоть до проектных величин 1 Тл и 0.5 МА



Рис. 6. Временной ход тока плазмы I<sub>p</sub>, напряжения на ее обходе U<sub>p</sub> и вложенной ВЧ-мощности в разряде № 37962.

соответственно. Новые эксперименты вместе с данными с NSTX-U [37] и MAST-U [38] позволят расширить понимание физики сферических токамаков, необходимое для проектирования, разработки и создания сферических токамаков следующего поколения [39].

Эксперименты выполнены на уникальной научной установке "Сферический токамак Глобус-М", входящей в состав федерального центра коллективного пользования "Материаловедение и диагностика в передовых технологиях" (уникальный идентификатор RFMEFI62119X0021). Исследования удержания энергии плазмы, изложенные во втором разделе, выполнены Е.О. Киселевым, Г.С. Курскиевым, В.Б. Минаевым, Н.В. Сахаровым, П.Б. Щеголевым, А.Ю. Тельновой и Е.А. Тюхменевой при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 17-72-20076. Исследования альфвеновских колебаний, представленные в третьем разделе, выполнены В.К. Гусевым и Ю.В. Петровым при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 17-12-01177. Оборудование анализатора атомов перезарядки со сканирующей платформой и исследования быстрых ионов, описанные в первом разделе, выполнены Н.Н. Бахаревым, А.Д. Мельником и В.А. Токаревым при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 18-32-20031. Эксперименты по нижнегибридной генерации тока плазмы, описанные в четвертом разделе, выполнены в рамках государственного задания министерства науки и высшего образования РФ.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 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., Sladkomedova A.D., Solokha V.V., Tanchuk V.N., Telnova A.Yu., Tokarev V.A., Tolstyakov S.Yu., Zhilin E.G. // Nucl. Fusion, 2017. V. 57. 066047.
- Gusev V.K., Bakharev N.N., Belyakov V.A., Ber B.Ya., 2. Bondarchuk E.N., Bulanin V.V., Bykov A.S., Chernyshev F.V., Demina E.V., Dyachenko V.V., Goncharov P.R., Gorodetsky A.E., Gusakov E.Z., Iblyaminova A.D., Ivanov A.A., Irzak M.A., Kaveeva E.G., Khitrov S.A., Khokhlov M.V., Khromov N.A., Kolmogorov V.V., Kornev 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.Yu., Varfolomeev V.I., Vekshina E.O., Voronin A.V., Voskoboinikov S.P., Wagner F., Yashin A. Yu., Zadvitskiy G.V., Zakharov A.P., Zalavutdinov R.Kh., Zhilin E.G. // Nucl. Fusion. 2015. V. 55. 104016
- 3. Gusev V.K., Azizov E.A., Alekseev A.B., Arneman A.F., Bakharev N.N., Belyakov V.A., Bender S.E., Bondarchuk E.N., Bulanin V.V., Bykov A.S., Chernyshev F.V., Chugunov I.N., Dyachenko V.V., Filatov O.G., Iblyami-

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ том 46 № 7 2020

nova A.D., Irzak M.A., Kavin A.A., Kurskiev G.S., Khitrov S.A., Khromov N.A., Kornev V.A., Krasnov S.V., Kuznetsov E.A., Labusov A.N., Larionov M.M., Lobanov K.M., Malkov A.A., Melnik A.D., Minaev V.B., Mineev A.B., Mironov M.I., Miroshnikov I.V., Novokhatsky A.N., Ovsyannikov A.D., Panasenkov A.A., Patrov M.I., Petrov M.P., Petrov Yu.V., Rozhansky V.A., Rozhdestvensky V.V., Saveliev A.N., Sakharov N.V., Shchegolev P.B., Shcherbinin O.N., Senichenkov I.Yu., Sergeev V.Yu., Shevelev A.E., Stepanov A.Yu., Tanchuk V.N., Tolstyakov S.Yu., Varfolomeev V.I., Voronin A.V., Wagner F., Yagnov V.A., Yashin A.Yu., Zhilin E.G. // Nucl. Fusion. 2013. V. 53. 093013.

- Gusev V.K., Bakharev N.N., Ber B.Ya., Bulanin V.V., Chernyshev F.V., Dyachenko V.V., Goncharov P.R., Gusakov E.Z., Iblyaminova A.D., Irzak M.A., Kaveeva E.G., Khitrov S.A., Khromov N.A., Kornev V.A., Kurskiev G.S., Melnik A.D., Minaev V.B., Mineev A.B., Mironov M.I., Novokhatsky A.N., Patrov M.I., Petrov A.V., Petrov Yu.V., Rozhansky V.A., Sakharov N.V., Saveliev A.N., Senichenkov I.Yu., Shchegolev P.B., Shcherbinin O.N., Tolstyakov S.Yu., Varfolomeev V.I., Voronin A.V., Yashin A.Yu. // Plasma Phys. Control. Fusion. 2016. V. 58. 014032.
- Bakharev N.N., Bulanin V.V., Chernyshev F.V., Gusev V.K., Khromov N.A., Kiselev E.O., Kurskiev G.S., Melnik A.D., Minaev V.B., Mironov M.I., Miroshnikov I.V., Patrov M.I., Petrov A.V., Petrov Yu.V., Sakharov N.V., Shchegolev P.B., Sladkomedova A.D., Solokha V.V., Telnova A.Yu., Tokarev V.A., Tolstyakov S.Yu., Yashin A.Yu. // Nucl. Fusion. 2018. V. 58. 126029.
- Извозчиков А.Б., Петров М.П., Петров С.Я., Чернышев Ф.В., Шустов И.В. // ЖТФ. 1992. Т. 62. С. 157. [Izvozchikov A.B., Petrov M.P., Petrov S.Ya., Chernyshev F.V., Shystov I.V. // Tech. Phys. 1992. V. 37. P. 201]
- 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., Shchegolev P.B., Kiselev E.O. // Plasma Sci. Technol. 2019. V. 21. 105104.
- Буланин В.В., Гусев В.К., Курскиев Г.С., Минаев В.Б., Патров М.И., Петров А.В., Петров М.А., Петров Ю.В., Тельнова А.Ю., Яшин А.Ю. // Письма в ЖТФ. 2017. Т. 43. С. 40. [Bulanin V.V., Gusev V.K., Kurskiev G.S., Minaev V.B., Patrov M.I., Petrov A.V., Petrov M.A., Petrov Yu.V., Telnova A.Yu., Yashin A.Yu. // Tech. Phys. Lett. 2017. V. 43. P. 1067]
- 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. 012002.
- Tokarev V.A., Gusev V.K., Khromov N.A., Patrov M.I., Petrov Yu.V., Varfalomeev V.I. // J. Phys.: Conf. Ser. 2018. V. 1094. 012003.
- Shchegolev P.B., Minaev V.B., Telnova A.Yu., Bakharev N.N., Goncharov P.R., Gusev V.K., Kurskiev G.S., Miroshnikov I.V., Patrov M.I., Petrov Yu.V., Sakharov N.V., Shikhovtsev I.V., Tolstyakov S.Yu. // J. Phys.: Conf. Ser. 2017. V. 907. 012013.
- Шербинин О.Н., Дьяченко В.В., Гусев В.К., Варфоломеев В.И., Петров Ю.В., Сахаров Н.В. // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38. С. 1. [Shcherbinin O.N., D'yachenko V.V., Gusev V.K., Varfolomeev V.I., Petrov Yu.V., Sakharov N.V. // Tech. Phys. Lett. 2012. V. 38. P. 869]
- 13. Dyachenko V.V., Shcherbinin O.N., Gusakov E.Z., Gusev V.K., Irzak M.A., Kurskiev G.S., Petrov Yu.V., Save-

liev A.N., Sakharov N.V., Khitrov S.A., Khromov N.A., Varfolomeev V.I., Voronin A.V. // Nucl. Fusion. 2015. V. 55. 113001.

- Щёголев П.Б., Минаев В.Б., Бахарев Н.Н., Гусев В.К., Киселев Е.О., Курскиев Г.С., Патров М.И., Петров Ю.В., Тельнова А.Ю. // Физика плазмы. 2019. Т. 45. С. 213. [Shchegolev P.B., Minaev V.B., Bakharev N.N., Gusev V.K., Kiselev E.O., Kurskiev G.S., Patrov M.I., Petrov Yu.V., Telnova A.Yu. // Plasma Phys. Rep. 2019. V. 45. P. 195]
- Kurskiev G.S., Gusev V.K., Sakharov N.V., Bakharev N.N., Iblyaminova A.D., Shchegolev P.B., Avdeeva G.F., Kiselev E.O., Minaev V.B., Mukhin E.E., Patrov M.I., Petrov Yu.V., Telnova A.Yu. Tolstyakov S.Yu. // Plasma Phys. Control. Fusion. 2017. V. 59. 045010.
- Kurskiev G.S., Bakharev N.N., Bulanin V.V., Chernyshev F.V., Gusev V.K., Khromov N.A., Kiselev E.O., Minaev V.B., Miroshnikov I.V., Mukhin E.E., Patrov M.I., Petrov A.V., Petrov Yu.V., Sakharov N.V., Shchegolev P.B., Sladkomedova A.D., Solokha V.V., Telnova A.Yu., Tolstyakov S.Yu., Tokarev V.A., Yashin A.Yu. // Nucl. Fusion. 2019. V. 59. 066032.
- Telnova A.Yu., Kurskiev G.S., Kiselev E.O., Bakharev N.N., Gusev V.K., Khromov N.A., Medvedev S.Yu., Miinaev V.B., Miroshnikov I.V., Patrov M.I., Petrov Yu.V., Sakharov N.V., Sladkomedova A.D., Shchegolev P.B., Solokha V.V., Tokarev V.A., Tolstyakov S.Yu., Tukhmeneva E.A. // Plasma Sci. Technol. 2019. V. 21. 115101.
- Тельнова А.Ю., Курскиев Г.С., Мирошников И.В., Авдеева Г.Ф., Бахарев Н.Н., Гусев В.К., Минаев В.Б., Мельник А.Д., Петров Ю.В., Сахаров Н.В., Чернышев Ф.В., Щёголев П.Б. // Письма в ЖТФ. 2018. Т. 44. С. 100. [Tel'nova A.Yu., Kurskiev G.S., Miroshnikov I.V., Avdeeva G.F., Bakharev N.N., Gusev V.K., Minaev V.B., Mel'nik A.D., Petrov Yu.V., Sakharov N.V., Chernyshev F.V., Shchegolev P.B. // Tech. Phys. Lett. 2018. V. 44 (8). P. 700]
- Petrov Yu.V., Bakharev N.N., Gusev V.K., Minaev V.B., Kornev V.A., Kurskiev G.S., Patrov M.I., Sakharov N.V., Tolstyakov S.Yu., Shchegolev P.B. // J. Plasma Phys. 2015. V. 81. 515810601.
- 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., Курскиев Г.С., Чернышев Ф.В., Щёголев П.Б. // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. С. 99. [Petrov Yu.V., Bakharev N.N., Gusev V.K., Minaev V.B., Kornev V.A., Mel'nik A.D., Patrov M.I., Sakharov N.V., Tolstyakov S.Yu., Kurskiev G.S., Chernyshev F.V., Shchegolev P.B. // Tech. Phys. Lett. 2014. V. 40. P. 1136]
- Bakharev N.N., Chernyshev F.V., Goncharov P.R., Gusev V.K., Iblyaminova 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., Zadvitskiy G.V. // Nucl. Fusion 2015. V. 55. 043023.
- Бахарев Н.Н., Гусев В.К., Ибляминова А.Д., Корнев В.А., Курскиев Г.С., Мельник А.Д., Минаев В.Б., Патров М.И., Петров Ю.В., Сахаров Н.В., Толстяков С.Ю., Хромов Н.А., Чернышев Ф.В., Щёголев П.Б., Вагнер Ф. // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39. С. 22. [Bakharev N.N., Gusev V.K., Iblyaminova A.D., Kornev V.A., Kurskiev G.S., Melnik A.D., Minaev V.B., Patrov M.I., Petrov Yu.V., Sakharov N.V., Tol-

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ том 46 № 7 2020

styakov S.Yu., Khromov N.A., Chernyshev F.V., Shchegolev P.B., Wagner F. // Tech. Phys. Lett. 2013. V. 39. P. 1085]

- Gusev V.K., Aminov R.M., Berezutskiy A.A., Bulanin V.V., Chernyshev F.V., Chugunov I.N., Dech A.V., Dyachenko V.V., Ivanov A.E., Khitrov S.A., Khromov N.A., Kurskiev G.S., Larionov M.M., Melnik A.D., Minaev V.B., Mineev A.B., Mironov M.I., Miroshnikov I.V., Mukhin E.E., Novokhatsky A.N., Panasenkov A.A., Patrov M.I., Petrov A.V., Petrov Yu.V., Podushnikova K.A., Rozhansky V.A., Rozhdestvensky V.V., Sakharov N.V., Shevelev A.E., Senichenkov I.Yu., Shcherbinin O.N., Stepanov A.Yu., Tolstyakov S.Yu., Varfolomeev V.I., Voronin A.V., Yagnov V.A., Yashin A.Yu., Zhilin E.G. // Nucl. Fusion. 2011. V. 51. 103019.
- Senichenkov I. Yu., Kaveeva E.G., Gogoleva A.V., Vekshina E.O., Zadvitskiy G.V., Molchanov P.A., Rozhansky V.A., Voskoboynikov S.P., Khromov N.A., Lepikhov S.A., Gusev V.K. and The Globus-M Team // Nucl. Fusion. 2015. V. 55. 053012.
- Tokarev V.A., Gusev V.K., Khromov N.A., Patrov M.I., Petrov Yu.V., Varfalomeev V.I. // J. Phys.: Conf. Ser. 2018. V. 1094. 012003.
- Zalavutdinov R., Novokhatsky A., Gusev V., Bukhovets V., Gorodetsky A., Kuznetsov V., Litunovsky N., Makhankov A., Mazul I., Mukhin E. // Phys. Scr. 2017. 014043.
- Sladkomedova A.D., Alekseev A.G., Bakharev N.N., Gusev V.K., Khromov N.A., Kurskiev G.S., Minaev V.B., Patrov M.I., Petrov Yu.V., Sakharov N.V., Shchegolev P.B., Solokha V.V., Telnova A.Yu., Tolstyakov S.Yu., Zabrodsky V.V. // Rev. Sci. Instrum. 2018. V. 89. 083509.
- Воронин А.В., Бахарев Н.Н., Гусев В.К., Новохацкий А.Н., Поняев С.А. // ЖТФ. 2018. Т. 63. С. 692. [Voronin A.V., Bakharev N.N., Gusev V.K., Novokhatskii A.N., Ponyaev S.A. // Tech. Phys. 2018. V. 63. P. 670]
- Сахаров Н.В., Гусев В.К., Кавин А.А., Каменщиков С.Н., Лобанов К.М., Минеев А.Б., Патров М.И., Петров Ю.В. // Физика плазмы. 2018. Т. 44. С. 335.
   [Sakharov N.V., Gusev V.K., Kavin A.A., Kamenshchikov S.N., Lobanov K.M., Mineev A.B., Patrov M.I., Petrov Yu.V. // Plasma Phys. Rep. 2018. V. 44. P. 387]
- Valovič M., Akers R., Cunningham G., Garzotti L., Lloyd B., Muir D., Patel A., Taylor D., Turnyanskiy M., Walsh M. and the MAST team // Nucl. Fusion. 2009. V. 49. 075016.
- Kaye S.M., Bell M.G., Bell R.E., Fredrickson E.D., Le Blanc B.P., Lee K.C., Lynch S., Sabbagh S.A. // Nucl. Fusion. 2006. V. 46. P. 848.
- 32. ITER Physics Basis Expert Groups on Confinement and Transport and Confinement Modelling and Database and ITER Physics Basis Editors // Nucl. Fusion. 1999. V. 39. P. 2175.
- 33. Bakharev N.N., Bulanin V.V., Chernyshev F.V., Gusev V.K., Khromov N.A., Kiselev E.O., Kurskiev G.S., Melnik A.D., Minaev V.B., Mironov M.I., Miroshnikov I.V., Patrov M.I., Petrov A.V., Petrov Yu.V., Sakharov N.V., Shchegolev P.B., Sladkomedova A.D., Solokha V.V., Telnova A.Yu., Tokarev V.A., Tolstyakov S.Yu., Yashin A.Yu. // Nucl. Fusion. 2018. V. 58. 126029.
- Peysson Y. and the TORE SUPRA Team // Plasma Phys. Control. Fusion. 2000. P. 42. B87.

- 35. *Watari T.* // Plasma Phys. Control. Fusion. 1993. V. 35. A181.
- 36. Гусаков Е.З., Ирзак М.А., Пилия А.Д. // Письма в ЖЭТФ. 1997. Т. 65. С. 26. [Gusakov E.Z., Irzak M.A., Piliya A.D. // JETP Lett. 1997. V. 65. P. 25]
- 37. Kaye S.M., Battaglia D.J., Baver D., Belova E., Berkery J.W., Duarte V.N., Ferraro N., Fredrickson E., Gorelenkov N., Guttenfelder W., Hao G.Z., Heidbrink W., Izacard O., Kim D., Krebs I., Haye La R., Lestz J., Liu D., Morton L.A., Myra J., Pfefferle D., Podesta M., Ren Y., Riquezes J., Sabbagh S.A., Schneller M., Scotti F., Soukhanovskii V., Zweben S.J., Ahn J.W., Allain J.P., Barchfeld R., Bedoya F., Bell R.E., Bertelli N., Bhattacharjee A., Boyer M.D., Brennan D., Canal G., Canik J., Crocker N., Darrow D., Aparicio L., Diallo A., Domier C., Ebrahimi F., Evans T., Fonck R., Frerichs H., Gan K., Gerhardt S., Grav T., Jarboe T., Jardin S., Jaworski M.A., Kaita R., Koel B., Kolemen E., Kriete D.M., Kubota S., Le Blanc B.P., Levinton F., Luhmann N., Lunsford R., Maingi R., Maqueda R., Menard J.E., Mueller D., Myers C.E., Ono M., Park J.-K., Perkins R., Poli F., Raman R., Reinke M., Rhodes T., Rowley C., Russell D., Schuster E., Schmitz O., Sechrest Y., Skinner C.H., Smith D.R., Stotzfus-Dueck T., Stratton B., Taylor G., Tritz K., Wang W., Wang Z., Waters I., Wirth B. // Nucl. Fusion. 2019. V. 59. 112007.
- 38. Harrison J.R., Akers R.J., Allan S.Y., Allcock J.S., Allen J.O., Appel L., Barnes M., Ben N. Ayed, Boeglin W., Bowman C., Bradley J., Browning P., Bryant P., Carr M., Cecconello M., Challis C.D., Chapman S., Chapman I.T., Colyer G.J., Conroy S., Conway N.J., Cox M., Cunningham G., Dendy R.O., Dorland W., Dudson B.D., Easy L., Elmore S.D., Farley T., Feng X., Field A.R., Fil A., Fishpool G.M., Fitzgerald M., Flesch K., Fox F.J., Frerichs H., Gadgil S., Gahle D., Garzotti L., Ghim Y.-C., Gibson S., Gibson K.J., Hall S., Ham C., Heiberg N., Henderson S.S., Highcock E., Hnat B., Howard J., Huang J., Irvine W.A., Jacobsen A.S., Jones O., Katramados I., Keeling D., Kirk A., Klimek I., Kogan L., Leland J., Lipschultz, B., Lloyd B., Lovell J., Madsen B., Marshall O., Martin R., McArdle G., McClements K., McMillan B., Meakins A., Meyer H.F., Militello F., Milnes J., Mordijck S., Morris A.W., Moulton D., Muir D., Mukhi K., Murphy S.-Sugrue, Myatra O., Navlor G., Navlor P., Newton S.L., T. O'Gorman, Omotani J., O'Mullane M.G., Orchard S., Pamela J.P., Pangione L., Parra F., Perez R.V., Piron L., Price M., Reinke M.L., Riva F., Roach C.M., Robb D., Ryan D., Saarelma S., Salewski M., Scannell S., Schekochihin A.A., Schmitz O., Sharapov S., Sharples R., Silburn S.A., Smith S.F., Sperduti A., Stephen R., Thomas-Davies N.T., Thornton A.J., Turnyanskiy M., Valovič M., Van F. Wyk., Vann G.L., Walkden N.R., Waters I., Wilson H.R. and the MAST-U Team and the EUROfusion MST1 Team // Nucl. Fusion. 2019. V. 59. 112011.
- Menard J.E., Majeski R., Ono M., Bakharev N.N., Gusev V.K., Gryaznevich M., Kingham D., Mcnamara S., Thomas P., Hanada K., Harrison J., Lloyd B., Hwang Y.S., Lipschultz B., Wilson H., Nagayama Y., Ono Y., Takase Y., Reinke M., Tobita K., Gao Z., Alladio F., Fonck R.J. // Proc. 27<sup>th</sup> IAEA Fusion Energy Conf., Ahmedabad, 2018. IAEA-CN-258 OV/P-6.

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ том 46 № 7 2020