

04.2

Исследования альфвеновских мод на токамаке Глобус-М2 с использованием многочастотного доплеровского рефлектометра V-диапазона

© В.В. Буланин^{1,2}, И.М. Балаченков², В.И. Варфоломеев², В.К. Гусев², Г.С. Курскиев², В.Б. Минаев², М.И. Патров², А.В. Петров¹, Ю.В. Петров², А.М. Пономаренко¹, А.Ю. Тельнова², П.Б. Щеголев², А.Ю. Яшин^{1,2}

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

² Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: V.Bulandin@spbstu.ru

Поступило в Редакцию 14 октября 2020 г.

В окончательной редакции 11 ноября 2020 г.

Принято к публикации 11 ноября 2020 г.

Приведены новые сведения о развитии альфвеновских мод в сферическом токамаке Глобус-М2. Данные получены с использованием доплеровского рефлектометра V-диапазона с частотами зондирующего излучения от 50 до 75 GHz. В качестве многочастотного источника зондирующего излучения использовался синтезатор СВЧ-гармоник. В результате использования нового рефлектометра определена локализация тороидальной альфвеновской моды при магнитном поле 0.5 Т. Зарегистрированы спектральные компоненты альфвеновской моды с доплеровскими сдвигами частоты, обусловленные тороидальным вращением плазмы. В центральных областях разряда исследованы так называемые альфвеновские каскады.

Ключевые слова: плазма, токамак, альфвеновские моды, доплеровское обратное рассеяние.

DOI: 10.21883/PJTF.2021.04.50645.18584

В экспериментах на токамаке Глобус-М для регистрации альфвеновских мод впервые был предложен и реализован метод доплеровского обратного рассеяния (ДОР, DBS) [1–3]. Диагностика методом ДОР была основана на регистрации колебаний скорости дрейфа в скрещенных радиальном электрическом поле альфвеновской волны и магнитном поле токамака [3]. Измерения, проведенные с предельной частотой зондирования 48 GHz, показали, что для восстановления пространственного распределения обнаруженной тороидальной альфвеновской моды (ТАЕ) требуется использовать для зондирования излучение более высоких частот. Целью настоящей работы является исследование альфвеновских мод с доплеровского рефлектометра с частотами зондирования от 50 до 75 GHz, находящимися в более высокочастотном V-диапазоне, который соответствует расположению области обратного рассеяния в центральной зоне токамака. Эксперименты проводились на реконструированном сферическом токамаке Глобус-М2, в котором сохранена вакуумная камера, а магнитная система усилена с целью увеличения тороидального магнитного поля до 1 Т и тока плазмы до 0.5 МА [4]. Микроволновая схема была аналогична схеме, предложенной впервые на токамаке ДПП-D [5]. Использовались умножитель частоты в качестве синтезатора зондирующего излучения на шести частотах (50, 55, 60, 65, 70, 75 GHz) и местный гетеродин с частотой 63 GHz. Применялся набор полосовых фильтров, который обеспечивал селекцию сигналов на шести промежуточных частотах. Квадратурное детектирование этих сигналов позволяло получать шесть I (in-phase) и

Q (quadrature) сигналов, которые поступали на многоканальный аналого-цифровой преобразователь LTR210 с частотой оцифровки 5 MHz. В целом микроволновая схема была изготовлена в DOC company SPB. Зондирование плазмы и прием обратно рассеянного излучения O-моды осуществлялись через две отдельные рупорные антенны. Система поворота антенн, находящаяся в экваториальной плоскости на внешнем обходе тора, позволяла осуществлять наклон как в тороидальном, так и в полоидальном направлении. Выходные сигналы IQ-детекторов использовались для определения доплеровского частотного сдвига и исследования колебаний скоростей вращения плазмы на частоте альфвеновских колебаний. Доплеровский сдвиг определялся как производная фазы комплексного сигнала IQ-детектора, а колебания производной фазы на частотах альфвеновских колебаний выделялись при спектральном анализе [3].

Первые эксперименты с использованием многочастотной диагностики доплеровского обратного рассеяния были ориентированы на выяснение того, насколько ТАЕ-мода, обнаруженная ранее на токамаке Глобус-М при тороидальном магнитном поле 0.5 Т [2], простирается внутрь разряда. На рис. 1 отмечен фрагмент радиального профиля амплитуды полоидальной компоненты магнитного поля ТАЕ, полученный в разряде #37001 при частотах зондирования 20, 29, 39 и 48 GHz. На токамаке Глобус-М2 в разряде #39197 были воспроизведены условия разряда #37001 (а именно магнитное поле 0.5 Т, ток разряда 240 кА и средняя по хорде плотность плазмы $4 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$) при той же мощности и энергии

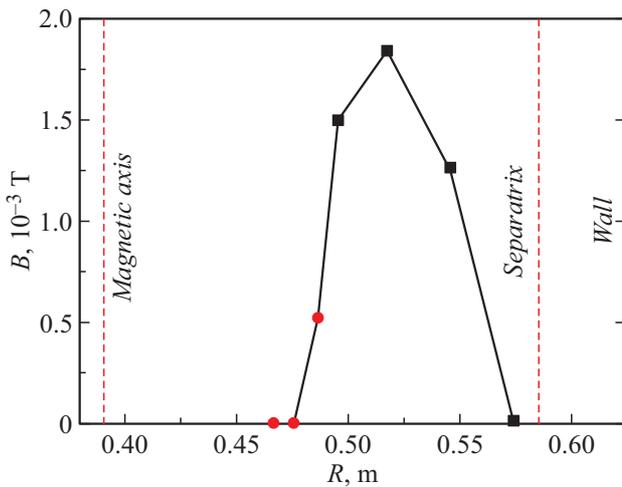


Рис. 1. Радиальная зависимость амплитуды колебаний полоидальной компоненты магнитного поля в ТАЕ. Квадраты — #37001, $t = 145$ ms, кружки — #39197, $t = 137$ ms.

инжектируемого пучка нейтральных атомов (800 kW и 28 kV соответственно). В результате в разряде #39197 развивалась альфвеновская мода с той же частотой и амплитудой, что и в разряде #37001. Сравнение проводилось по измерениям с помощью магнитных зондов (МР). В разряде #39197 использовался новый многочастотный доплеровский рефлектометр. Плотность плазмы была такова, что микроволновые пучки на частотах 75, 70 и 65 GHz проходили объем плазмы практически без искривления траектории, когда условия ДОР не обеспечивались. Данные, полученные с использованием излучения на частотах 60, 55 и 50 GHz, представлены на рис. 1 в виде фрагмента радиальной зависимости амплитуд колебаний полоидального магнитного поля на частотах ТАЕ. Можно полагать, что данные двух экспериментов описывают область локализации ТАЕ в целом. Полученное радиальное распределение убедительно демонстрирует спад колебаний ТАЕ к центру разряда и их исчезновение при нормированном малом радиусе токамака $\rho = 0.5$. Благодаря вновь полученным данным мы смогли отобразить из предложенных ранее теоретических моделей, описывающих развитие ТАЕ в токамаке Глобус-М/М2 [6], ту, которая дает наиболее близкие к эксперименту результаты по частоте и локализации моды. Эта модель плазмы с закрепленной границей из работы [6] и будет в дальнейшем использоваться для моделирования ТАЕ в токамаке Глобус-М2.

При увеличении магнитного поля до 0.7 Т в токамаке Глобус-М2 с использованием магнитной диагностики и новой схемы ДОР были обнаружены ТАЕ-колебания в диапазоне 300 kHz. Отметим, что эта мода развивалась на поздней стадии нагрева плазмы с помощью инжекции пучка нейтральных атомов (NBI), через 35 ms после включения NBI. Характерные спектры колебаний скорости и сигналов магнитного зонда приведены на рис. 2. На рисунке видны спектральные составляющие, отстоящие

друг от друга на расстояние 48 kHz. Путем анализа сигналов массива магнитных зондов было установлено, что эти частотные составляющие соответствуют альфвеновским модам с тороидальными числами $n = 1, 2$ и 3. Такие спектры регистрировались методом ДОР при частотах зондирования 50 и 55 GHz и не наблюдались на частотах 39 и 60 GHz, что, видимо, соответствует существованию локального максимума в окрестности нормированного радиуса $\rho = 0.5$. Аналогичные спектры наблюдались ранее на токамаках DIII-D [7], JET [8], COMPASS [9] и NSTX [10]. Они объяснялись тем, что частота колебаний, наблюдаемая в лабораторной системе координат, сдвинута относительно альфвеновской частоты f_{TAE} на доплеровский частотный сдвиг, который обусловлен тороидальным вращением плазмы, вызываемым продольной инжекцией пучка нейтральных атомов [7]:

$$f_n^{LAB} = f_{TAE} + n f_T(r). \quad (1)$$

Здесь $f_T(r) = V_T(r)/2\pi R$ (V_T — тороидальная скорость вращения плазмы). Эта спектральная зависимость от модового числа n качественным образом отличается от тех зависимостей, которые отмечались на токамаке Глобус-М в периферийных областях разряда, когда модовым числам n соответствовали кратные спектральные гармоники альфвеновской частоты: $f_n^{LAB} = n f_{TAE}$ [3]. Можно полагать что отличие в спектрах обусловлено тем, что в при больших магнитных полях $B_T = 0.7$ Т, когда обеспечивается лучшее удержание ионов высоких энергий, через определенное время после включения NBI скорость тороидального вращения, определенная по доплеровскому сдвигу $f_T(r)$, достигает значения,

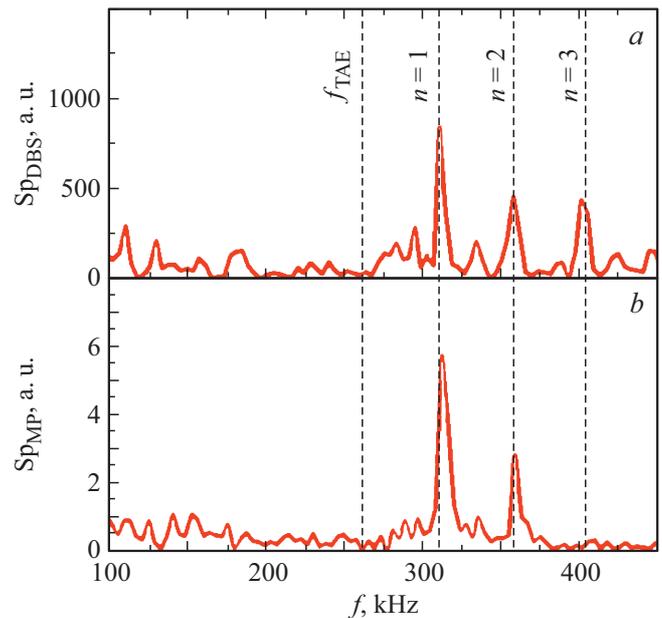


Рис. 2. *a* — спектр колебаний скорости вращения плазмы в разряде #39232, частота зондирования 50 GHz; *b* — спектр колебаний сигналов магнитного зонда. Время 159.7 ms.

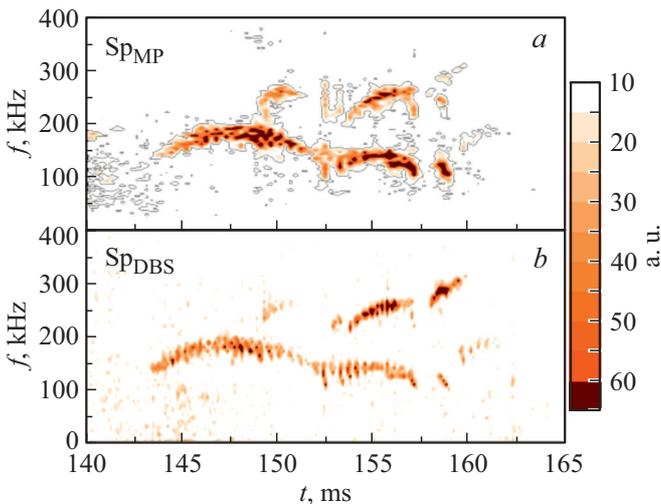


Рис. 3. Спектрограммы колебаний сигнала магнитного зонда (а) и скорости вращения (б) при возникновении альфвеновских каскадов в разряде #38388 при зондировании плазмы на частоте 48 GHz.

равного $1.6 \cdot 10^5$ m/s (для большого радиуса токамака $R = 52$ cm). Эти данные планируется сравнить с результатами измерения тороидальной скорости методом CHERS. Динамику нарастания тороидальной скорости проследить было невозможно, так как альфвеновская мода с доплеровски сдвинутыми частотами возникала только через 35 ms после начала NBI.

Необходимость использования более высокочастотного диапазона зондирующего излучения в наибольшей степени проявилась при регистрации альфвеновских колебаний в разрядах с обращенным широм магнитного поля (RSAE) или так называемых альфвеновских каскадов. Такие колебания развиваются в области минимума коэффициента запаса устойчивости q_{\min} , т.е. в центральных областях разряда, и для их регистрации методом ДОП необходимо в условиях токамака Глобус-М2 переходить на зондирование с использованием излучения V-диапазона. Колебания RSAE на токамаке Глобус-М2 были зарегистрированы с помощью магнитных зондов в разрядах в NBI на стадии нарастания тока (рис. 3, а), когда в плазме возможно появление обратного шира магнитного поля [11]. Возникновение RSAE объяснялось уменьшением параметра $\beta_e = 8\pi p_e / B_0^2$ (p_e — газокINETическое давление электронов, B_0 — поле на магнитной оси) при увеличении магнитного поля в токамаке Глобус-М2 до 0.7 T [11]. Одновременно с появлением колебаний RSAE в сигналах магнитного зонда колебания с такой же эволюцией частоты наблюдались в спектрограммах колебаний скорости, которая определялась методом ДОП (рис. 3, б). В каскаде наблюдались подъем частоты при уменьшении q_{\min} , отвечающий развитию RSAE, и спад частоты при переходе к колебаниям ТАЕ. Детальный анализ спектров, позволяющий определить минимальные значения q , приведен в работе [11]. Отме-

тим, что привлечение данных ДОП о локализации RSAE позволяет оценить радиус с минимальным значением q и сравнить этот радиус с расчетными данными, полученными с привлечением кода ASTRA [11].

Таким образом, эксперименты с использованием доплеровского обратного рассеяния в более высокочастотном V-диапазоне обеспечили измерения радиальных профилей интенсивности различных альфвеновских мод, возникающих при нейтральной инжекции, вдоль всего малого радиуса установки. Это позволило окончательно определить локализацию ТАЕ при магнитном поле 0.5 T, что способствовало выбору правильной модели для расчета альфвеновского континуума и структуры мод из ранее предложенных [6]; применить метод магнитогидродинамической спектроскопии для определения эволюции q_{\min} в токамаке Глобус-М2 при регистрации альфвеновских каскадов; с помощью анализа спектров определить скорость тороидального вращения плазмы в области одновременного развития ТАЕ с различными волновыми числами n .

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 17-12-01177-П).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] В.В. Буланин, В.К. Гусев, Г.С. Курскиев, В.Б. Минаев, М.И. Патров, А.В. Петров, М.А. Петров, Ю.В. Петров, А.Ю. Тельнова, А.Ю. Яшин, Письма в ЖТФ, **43** (23), 40 (2017). DOI: 10.21883/PJTF.2017.23.45274.16986 [Пер. версия: 10.1134/S1063785017120033].
- [2] В.В. Буланин, В.К. Гусев, Г.С. Курскиев, В.Б. Минаев, М.И. Патров, А.В. Петров, Ю.В. Петров, А.Ю. Яшин, Письма в ЖТФ, **45** (21), 44 (2019). DOI: 10.21883/PJTF.2019.21.48474.1798 [Пер. версия: 10.1134/S1063785019110051].
- [3] В.В. Буланин, Н.Н. Бахарев, В.К. Гусев, Г.С. Курскиев, В.Б. Минаев, М.И. Патров, А.В. Петров, Ю.В. Петров, Н.В. Сахаров, П.Б. Щёголев, А.Ю. Тельнова, С.Ю. Толстяков, А.Ю. Яшин, ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, **42** (4), 52 (2019). DOI: 10.21517/0202-3822-2019-42-4-52-60
- [4] N.N. Bakharev, I.M. Balachenkov, F.V. Chernyshev, I.N. Chugunov, V.V. Dyachenko, V.K. Gusev, M.V. Iliasova, E.M. Khilkevitch, N.A. Khromov, E.O. Kiselev, A.N. Konovalov, G.S. Kurskiev, V.B. Minaev, A.D. Melnik, I.V. Miroshnikov, A.N. Novokhatsky, M.I. Patrov, Yu.V. Petrov, N.V. Sakharov, P.B. Shchegolev, A.E. Shevelev, O.M. Skrekel, A.Yu. Telnova, V.A. Tokarev, S.Yu. Tolstyakov, E.A. Tukhmeneva, V.I. Varfolomeev, A.V. Voronin, Plasma Phys. Rep., **46**, 675 (2020). DOI: 10.1134/S1063780X20070016

- [5] W.A.Peebles, T.L. Rhodes, J.C. Hillesheim, L. Zeng, C. Wannberg, *Rev. Sci. Instrum.*, **81**, 10D902 (2010). DOI: 10.1063/1.3464266
- [6] С.Ю. Медведев, А.А. Мартынов, В.К. Гусев, Ю.В. Петров, М.И. Патров, А.Ю. Тельнова, А.А. Иванов, Ю.Ю. Пошехонов, *ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез*, **41** (2), 95 (2018). DOI: 10.21517/0202-3822-2018-41-2-95-104
- [7] E.J. Strait, W.W. Heidbrink, A.D. Turnbull, *Plasma Phys. Control. Fusion*, **36**, 1211 (1994). DOI: 10.1088/0741-3335/36/7/008
- [8] S.E. Sharapov, *Trans. Fusion Sci. Technol.*, **61**, 104 (2012). DOI: 10.13182/FST12-A13497
- [9] T. Markovic, J. Stockel, J. Seidl, A. Melnikov, S. Medvedev, in *Proc. of the 23rd Annual Conf. of Doctoral Students (WDS 2014)* (Prague, 2014), p. 199–203.
- [10] M. Podestá, R.E. Bell, A. Bortolon, N.A. Crocker, D.S. Darrow, A. Diallo, E.D. Fredrickson, G.-Y. Fu, N.N. Gorelenkov, W.W. Heidbrink, G.J. Kramer, S. Kubota, V.P. LeBlanc, S.S. Medley, H. Yuh, *Nucl. Fusion* **52**, 094001 (2012). DOI: 10.1088/0029-5515/52/9/094001
- [11] И.М. Балаченков, Ю.В. Петров, В.К. Гусев, Н.Н. Бахарев, В.В. Буланин, В.И. Варфоломеев, Н.С. Жильцов, Е.О. Киселёв, Г.С. Курскиев, В.Б. Минаев, М.И. Патров, А.В. Петров, А.М. Пономаренко, Н.В. Сахаров, А.Ю. Тельнова, В.А. Токарев, Н.А. Хромов, П.Б. Щеголев, А.Ю. Яшин, *Письма в ЖТФ*, **46** (23), 3 (2020). DOI: 10.21883/PJTF.2020.23.50338.18450