

04.2

Исследование полоидального вращения плазмы в присутствии магнитного острова на токамаке ФТ-2 методом доплеровского усиленного рассеяния

© Д.Ю. Батырев, А.Б. Алтухов, А.Д. Гурченко, Е.З. Гусаков, Л.А. Есипов,
М.Ю. Кантор, Д.В. Куприенко, С.И. Лашкул

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: d.batyrev@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 3 ноября 2023 г.

В окончательной редакции 29 января 2024 г.

Принято к публикации 17 февраля 2024 г.

Измерения скорости полоидального вращения плазмы в присутствии магнитного острова с полоидальным и тороидальным модовыми числами $m/n = 2/1$ проведены методом доплеровского усиленного рассеяния. Получена оценка величины возмущения скорости вращения внутри острова, достигавшая 250 м/с. Вклад магнитного острова в возмущение средней скорости полоидального вращения плазмы оказался максимальным вблизи его границ, где достигал 8–17%.

Ключевые слова: возмущение скорости плазмы токамака, магнитный остров, доплеровское усиленное рассеяние.

DOI: 10.61011/PJTF.2024.11.57900.19792

Магнетогидродинамические (magnetohydrodynamics, MHD) неустойчивости в токамаке представляют интерес для исследования, так как их развитие влияет на качество удержания плазмы. В частности, неустойчивость тиринг-моды (ТМ) приводит к изменению равновесия плазмы, оно становится несимметричным, что характеризуется появлением цепочки магнитных островов вблизи рациональных магнитных поверхностей. При этом силовые линии магнитного поля соединяют внутреннюю и внешнюю стороны острова, вызывая увеличение радиальных потоков тепла и частиц и соответственно ухудшение удержания.

На токамаке Глобус-М2 [1] с помощью доплеровской рефлектометрии в окрестности ТМ было зафиксировано появление колебаний доплеровского частотного сдвига спектра рассеяния f_D , по которому оценивается скорость вращения плазмы. При этом частота колебаний совпадала с частотой вращения ТМ с модовыми числами $m/n = 2/1$. Также влияние острова на вращение плазмы отмечалось и на токамаке ТУМАН-3М [2]. На стеллараторе W-7X [3] в условиях с неподвижным магнитным островом с конфигурацией $m/n = 5/5$ при сравнении радиальных профилей рассчитанной неоклассической полоидальной скорости вращения плазмы со скоростью V_θ , полученной из измерений методом доплеровской рефлектометрии, были обнаружены различия между их величинами внутри острова. Разница (максимальная на границах острова и минимальная в его центре) в так называемой О-точке была интерпретирована авторами как вклад магнитного острова во вращение плазмы.

В настоящей работе детально исследованы колебания доплеровского частотного сдвига спектра диагностики усиленного рассеяния (УР) [4], чувствительного к коле-

баниям V_θ , а также проведено сопоставление с колебаниями магнитного поля, регистрирующимися с помощью МНД-зондов. Эксперименты проводились на токамаке ФТ-2 (большой радиус 55 см, радиус диафрагмы 7.9 см) в водородной плазме в серии повторяющихся разрядов длительностью до 50 ms с максимальными значениями плазменного тока 33 kA, тороидального магнитного поля 2.3 T, центральной плотности $2.1 \cdot 10^{19} \text{ m}^{-3}$ и центральной электронной температуры 600 eV. С помощью кода ASTRA [5] был восстановлен профиль запаса устойчивости q , при этом магнитная поверхность с $q = 2$, вблизи которой с помощью набора МНД-зондов диагностировался магнитный остров с $m/n = 2/1$, вращающийся в электронном диамагнитном направлении, располагалась на малом радиусе $r = 4.8$ см. На рис. 1, а на спектре мощности сигнала одного из МНД-зондов (кривая 1) видна спектральная линия на частоте $f_{\text{MHD}} = 35$ kHz. Приемопередающая антенна диагностики УР была сдвинута вверх на 15 mm относительно экватора, а для зондирования использовался диапазон частот 59–69 GHz, что позволяло добиться смещения радиального положения области рассеяния в пределах $r = 3$ –6.5 см. Анализ меняющихся во времени спектров УР позволил восстановить эволюцию значений их доплеровского частотного сдвига $f_D(t)$ с временным разрешением в 2.6 μs . В некотором интервале по r в спектре мощности полученного сигнала $f_D(t)$ наблюдалось появление одной или двух спектральных линий. Так, при $r = 4.7$ см в спектрах сигнала $f_D(t)$ (кривая 2 на рис. 1, а) и МНД-зонда (кривая 1) присутствуют линии на частоте f_{MHD} . Когерентность между двумя сигналами на этой частоте, представленная кривой 3 на рис. 1, б, достигала значения 90%, что выше шумового уровня (линия 4).

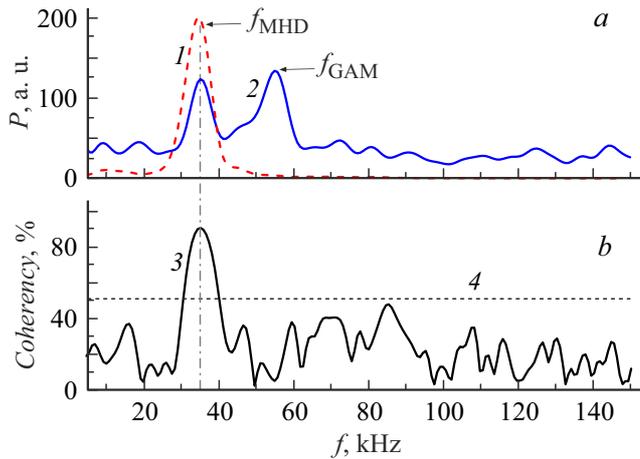


Рис. 1. *a* — спектры мощности для сигналов МНД-зонда (1) и $f_D(t)$ (2); *b* — спектр когерентности между ними (3) и уровень шумовой когерентности (4).

В спектре сигнала $f_D(t)$ присутствует вторая линия на большей частоте f_{GAM} , соответствующая геодезической акустической моде (geodesic acoustic mode, GAM), ранее изученной в различных режимах токамака ФТ-2 [4].

Для определения амплитуд колебаний сигнала $f_D(t)$ для каждой из линий в его спектре на основе выражения

$$f_{Dtest}(t) = \delta f_{MHD} \cos(2\pi f_{MHD}t) + \delta f_{GAM} \cos(2\pi f_{GAM}t) + n(t) \quad (1)$$

составлялся тестовый сигнал, включающий в себя две гармоники на частотах МНД и GAM с амплитудами δf_{MHD} и δf_{GAM} и случайный шум n . Параметры в выражении (1) подбирались таким образом, чтобы воспроизвести экспериментально наблюдаемый спектр. В результате подбора, выполнявшегося для различных положений УР, были построены профили амплитуд колебаний $f_D(t)$ на соответствующих частотах, представленные на рис. 2, *a* (заштрихованные области 1 и 2) вместе с профилем усредненного за 2.3 ms значения доплеровского частотного сдвига $\langle f_D \rangle$ (кружки, соединенные кривой 3). Амплитуды колебаний на частотах МНД и GAM достигают значения 0.2 MHz, но занимают различные радиальные области, частично перекрываясь. Область локализации колебаний на частоте МНД-возмущения располагается вблизи магнитной поверхности с $q = 2$, а ширина области составляет 1.5 см. Отметим, что определение амплитуд линий МНД и GAM затруднительно без применения спектрального анализа из-за значительной величины дисперсии сигнала $f_D(t)$ (закрашенная область 4 на рис. 2, *a*), вызванной наличием широкополосного шума.

По величине доплеровского частотного сдвига $f_D = q\theta V_\theta / (2\pi)$ можно оценить скорость V_θ при постоянном $q\theta$. Вблизи поверхности верхнего гибридного резонанса (upper hybrid resonance, UHR) происходит

рост нормальной к этой поверхности компоненты волнового вектора зондирующей необыкновенной волны k_{iUHR} , в силу этого рассеяние происходит на флуктуациях в широком диапазоне по волновым числам $q_{UHR} = 2k_{iUHR}$, вносящим вклад в сигнал с разным весом. Для получения радиального профиля волновых чисел флуктуаций q_{UHR} , обеспечивающих максимальный вклад в сигнал УР на частоте f_D , проводились прямые измерения с помощью корреляционной модификации УР [4,6]. Измеренное значение q_{UHR} использовалось для вычисления соответствующей полоидальной проекции q_θ . Полученные на основе доплеровских частотных сдвигов скорости плазмы, вращающейся в электронном диамагнитном направлении, представлены на рис. 2, *b*. Светлыми (1) и закрашенными (2) кружками показаны амплитуды колебаний скорости δV_{MHD} и δV_{GAM} на частотах МНД и GAM, возникающие относительно среднего значения скорости $\langle V_\theta \rangle$, представленного квадратами 3. Интерпретация периодического возмущения скорости на частоте GAM тривиальна, так как оно связано с локальным симметричным колебанием радиального электрического поля [4]. Ситуация с колебаниями на частоте МНД не так однозначна. На первый взгляд из формы профиля скорости 1, показанного на рис. 2, *b*, следует, что возмущение δV_{MHD} в окрестности магнитного острова растет до величины 0.4 km/s при средней скорости, достигающей 2 km/s. Значения периодического возмущения скорости определяются на основе значений колебаний f_D , однако последние могут быть не связаны именно с возмущением скорости внутри магнитного острова. При вращении острова с возмущенной относительно фонового уровня плотностью [7] поверхность UHR периодически смещается по r , что в присутствии радиального градиента V_θ приводит к модуляции амплитуды наблюдаемого в эксперименте доплеровского сдвига спектра УР. Другим эффектом, возникающим при вращении острова, является периодическое искажение формы поверхности UHR, вызывающее колебания полоидальной проекции волнового вектора флуктуаций q_θ . Таким образом, интерпретация измеряемых колебаний f_D требует учета асимметрии магнитных поверхностей, которую привносит магнитный остров. Форма магнитных поверхностей острова, расположенного на резонансной поверхности с радиусом r_{res} и имеющего ширину w , описывалась в соответствии с моделью, развитой в работе [8]. В своем анализе результатов эксперимента мы пользуемся малостью возмущения магнитного поля, связанного с магнитным островом. Это позволяет использовать метод возмущений и рассматривать влияние различных факторов аддитивно. Для исследования влияния возмущенной в острове плотности $\delta n/n$ на модуляцию как положения рассеяния, так и величины q_θ проводилось моделирование, в котором возмущение скорости δV_{mod} вычислялось для острова, вращающегося с частотой f_{MHD} в фоновой плазме, характеризуемой экспериментально измеренным профилем средней скорости $\langle V_\theta \rangle$. Перебор значений параметров моделирования r_{res} ,

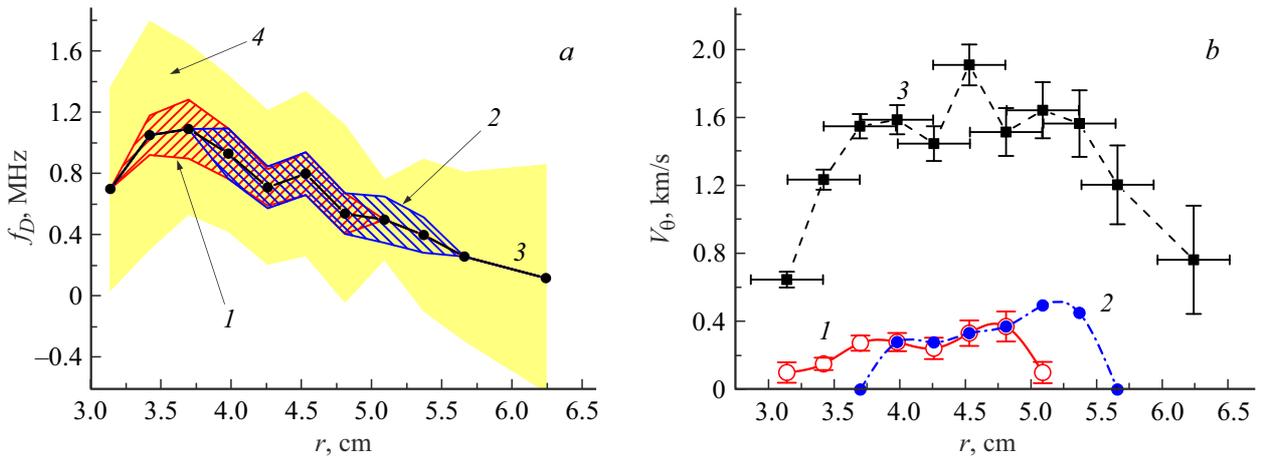


Рис. 2. *a* — радиальные профили параметров, характеризующих доплеровский частотный сдвиг $f_D(t)$: амплитуды его колебаний на частотах MHD (1) и GAM (2), показанные относительно уровня среднего значения (3) на фоне его дисперсии (4); *b* — радиальные профили параметров, характеризующих скорость V_θ : амплитуды ее колебаний на частотах MHD (1), GAM (2) и среднее значение (3).

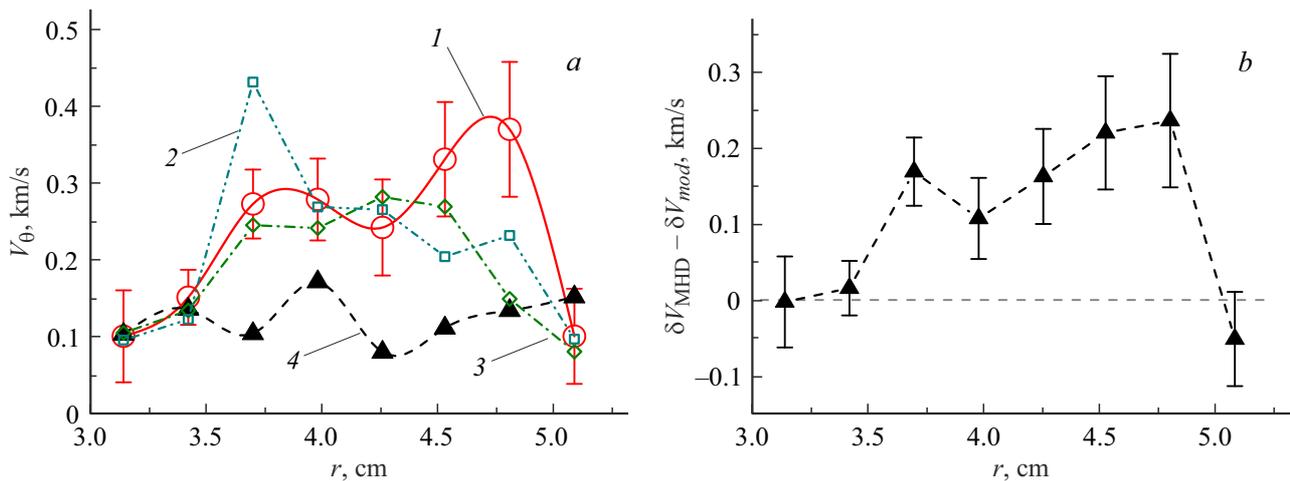


Рис. 3. *a* — радиальные профили колебаний скорости на MHD-частоте: „экспериментальный“ δV_{MHD} (1), „модельные“ для $MAPE = 20\%$ с большим возмущением плотности $\delta n/n = 25\%$ (2) и малым резонансным радиусом $r_{res} = 3.6$ см (3), „модельный“ δV_{mod} для реалистичных параметров (4); *b* — разница между профилями 1 и 4.

w и $\delta n/n$ позволил минимизировать различия между „экспериментальным“ профилем колебаний скорости на MHD-частоте δV_{MHD} , оцененным из измеренных значений f_D в пренебрежении влиянием острова на положение рассеяния и значение полоидального волнового числа q_θ , и „модельным“ профилем δV_{mod} , где указанные особенности принимались в расчет. Вариация значений $\delta n/n$ в острове выполнялась в интервале от 0 до 25%. С помощью лазерного томсоновского рассеяния [9] в изучаемом режиме были выполнены сравнительные измерения временной динамики плотности электронов как на резонансной поверхности $q = 2$, так и вне острова, показавшие, что максимальное относительное возмущение плотности $\delta n/n$ во внутренних областях острова не превышало 10%.

Попытка свести наблюдаемый профиль скорости δV_{MHD} , представленный на рис. 3, *a* кружками, соединенными кривой 1, только к механизмам в рамках рассматриваемой модели оказалась неудачной. С помощью вариации параметров минимальная средняя абсолютная ошибка в процентах (MAPE) между модельным и экспериментальным профилями возмущения скорости была уменьшена лишь до уровня 20%. Примеры полученных расчетных профилей показаны на рис. 3, *a* двумя группами символов (квадраты и ромбы, соединенные линиями 2 и 3). Для первого из этих расчетов (кривая 2) были получены параметры $r_{res} = 4.3$ см, $w = 1.1$ см, $\delta n/n = 25\%$, для второго (кривая 3) — параметры $r_{res} = 3.6$ см, $w = 1.4$ см, $\delta n/n = 10\%$. В первом случае параметр $\delta n/n$, а во втором случае параметр r_{res} ока-

зались далеки от оценок и измерений, выполненных с помощью других методов. Модельный профиль скорости δV_{mod} , полученный для параметров, ограниченного реалистичным интервалом значений, представлен треугольниками, соединенными кривой 4, при этом величина МАРЕ была минимизирована всего лишь до уровня 50% для следующих значений параметров: $r_{res} = 4.5$ см, $w = 1.2$ см, $\delta n/n = 10\%$. Хотя амплитуды возмущения скорости δV_{mod} оказались меньше δV_{MHD} , их вкладом пренебречь нельзя, поскольку он сравним или превышает уровень погрешности экспериментальных измерений. Полученный результат можно интерпретировать как демонстрацию того, что помимо конечного „модуляционного“ вклада в возмущение скорости δV_{mod} также присутствует и реальное возмущение скорости вращения в магнитном острове, которое можно оценить снизу как разницу $\delta V_{MHD} - \delta V_{mod}$, показанную на рис. 3, b. В профиле $\delta V_{MHD} - \delta V_{mod}$ значения (с учетом погрешностей) на краях, лежащих уже за границами острова, оказались близки к нулю, при этом вблизи границ острова скорость возрастает до 0.15–0.25 км/с, а при приближении к центру падает до 0.1 км/с.

Основным результатом настоящей работы, в которой интерпретировались наблюдаемые в эксперименте колебания частоты доплеровского сдвига спектра УР на частоте вращения магнитного острова, является оценка амплитуды колебаний полоидальной скорости вращения плазмы в острове, достигавшая 0.25 км/с. При ее получении было учтено возможное снижающее влияние эффектов модуляции положения УР и полоидального волнового числа флуктуаций. На фоне средней скорости вращения плазмы 1.5–2 км/с уровень возмущения скорости на границах острова не превышал 8–17%, уменьшаясь во внутренних областях острова.

Финансирование работы

Исследование финансировалось в рамках государственного задания ФТИ им. А.Ф. Иоффе № 0034-2021-0002, работа токамака ФТ-2 и базовых диагностик частично поддержана за счет государственного задания ФТИ им. А.Ф. Иоффе № 0040-2024-0028.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] A. Yashin, A. Ponomarenko, I. Balachenkov, G. Kurskiev, E. Kiselev, V. Minaev, A. Petrov, Y. Petrov, N. Sakharov, N. Zhiltsov, *Appl. Sci.*, **13** (6), 3430 (2023). DOI: 10.3390/app13063430
- [2] A. Yashin, A. Belokurov, L. Askinazi, A. Petrov, A. Ponomarenko and the TUMAN-3M Team, *Atoms*, **10** (4), 106 (2022). DOI: 10.3390/atoms10040106
- [3] T. Estrada, E. Maragkoudakis, D. Carralero, T. Windisch, J.L. Velasco, C. Killer, T. Andreeva, J. Geiger, A. Dinklage, A. Krämer-Flecken, G.A. Wurden, M. Beurskens, S. Bozhenkov, H. Damm, G. Fuchert, E. Pasch and the W7-X Team, *Nucl. Fusion*, **61** (9), 096011 (2021). DOI: 10.1088/1741-4326/ac146f
- [4] A.D. Gurchenko, E.Z. Gusakov, A.B. Altukhov, E.P. Selyunin, L.A. Esipov, M.Yu. Kantor, D.V. Kouprienko, S.I. Lashkul, A.Yu. Stepanov, F. Wagner, *Plasma Phys. Control. Fusion*, **55** (8), 085017 (2013). DOI: 10.1088/0741-3335/55/8/085017
- [5] G.V. Pereverzev, P.N. Yushmanov, *ASTRA. Automated system for transport analysis* (Aspen Technology, Inc., San Diego, USA, 2002).
- [6] E.Z. Gusakov, A.D. Gurchenko, A.B. Altukhov, A.Yu. Stepanov, L.A. Esipov, M.Yu. Kantor, D.V. Kouprienko, *Plasma Phys. Control. Fusion*, **48** (5A), A371 (2006). DOI: 10.1088/0741-3335/48/5A/S37
- [7] M. Kantor and the TEXTOR Team, in *Proc. of the 38th EPS Conf. on plasma physics* (Strasbourg, France, 2011), vol. 35G, paper P2.083, p. 837–840. <http://ocs.ciemat.es/EPS2011PAP/pdf/P2.083.pdf>
- [8] H.R. Wilson, *Fusion Sci. Technol.*, **49** (2T), 155 (2006). DOI: 10.13182/FST06-A1115
- [9] D.H. Froula, J.S. Ross, L. Divol, S.H. Glenzer, *Rev. Sci. Instrum.*, **77** (10), 10E522 (2006). DOI: 10.1063/1.2336451