

УДК 533.9

ВЛИЯНИЕ ТОРОИДАЛЬНОГО ВРАЩЕНИЯ ПЛАЗМЫ НА СПЕКТР ТОРОИДАЛЬНЫХ АЛЬФВЕНОВСКИХ МОД В СФЕРИЧЕСКОМ ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М2

© 2024 г. И. М. Балаченков^{а,*}, Ю. В. Петров^а, В. К. Гусев^а, Н. Н. Бахарев^а,
Н. С. Жильцов^а, Г. С. Курскиев^а, В. Б. Минаев^а, И. В. Мирошников^а,
А. М. Пономаренко^б, Н. В. Сахаров^а, А. Ю. Тельнова^а, Е. Е. Ткаченко^а,
П. Б. Щеголев^а, А. Ю. Яшин^б

^аФизико-технический институт им. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

^бСанкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: balachenkov@mail.ioffe.ru

Поступила в редакцию 19.04.2024 г.

После доработки 17.05.2024 г.

Принята к публикации 20.05.2024 г.

В экспериментах с инжекцией атомного пучка на сферическом токамаке Глобус-М2 были обнаружены наборы продолжительных гармоник тороидальных альфвеновских мод, равноудаленных друг от друга по частоте и сдвинутых от нуля на постоянную величину. При помощи микроволновой диагностики доплеровского обратного рассеяния определена центральная локализация тороидальных мод. В данной работе проверялась возможность «расщепления» тороидальных гармоник за счет доплеровского сдвига, вызванного тороидальным вращением плазмы. Установлено, что несдвинутая частота тороидальной альфвеновской моды, полученная из спектра сигнала магнитного зонда, находится в хорошем соответствии с частотой моды, рассчитанной на радиусе локализации, а частота вращения, также определенная из спектра сигнала магнитного зонда, коррелирует с частотой вращения, измеренной при помощи диагностики спектроскопии перезарядки, но отличается на постоянную величину. Обсуждаются возможные причины расхождений.

Ключевые слова: тороидальные альфвеновские моды, тороидальное вращение плазмы, сферический токамак

DOI: 10.31857/S0367292124070016, EDN: OJPMWX

1. ВВЕДЕНИЕ

Тороидальные альфвеновские моды (*Toroidal Alfvén Eigenmodes* – ТАЕ) являются одним из наиболее опасных типов альфвеновских собственных мод в токамаках, так как они могут приводить к потерям быстрых частиц, образующихся как в процессе протекания ядерных реакций, так и в результате работы систем дополнительного нагрева [1]. Проблема удержания быстрых частиц является одной из приоритетных задач УТС. В связи с этим ТАЕ одновременно являются одними из наиболее изученных типов альфвеновских мод: они наблюдались на множестве токамаков, как классических, таких как TFTR [2],

JET [3] и DIII-D [4], так и сферических, таких как MAST [3] и NSTX [5]. Наблюдениям ТАЕ посвящен ряд обзорных статей, например [6–8]. Частота ТАЕ дается выражением

$$f_{form}^{TAЕ} = \frac{c_A}{4\pi q(R_{TAЕ})R_0}, \quad (1)$$

где $c_A = B / \sqrt{\mu_0 \rho_i}$ – альфвеновская скорость, $q(R_{TAЕ})$ – коэффициент запаса устойчивости на радиусе локализации ТАЕ,

$$q(R_{TAЕ}) = \frac{m + 1/2}{n}, \quad (2)$$

R_0 – большой радиус токамака, μ_0 – магнитная проницаемость вакуума, ρ_i – массовая плотность ионов основной компоненты плазмы, а m и n –

полоидальный и тороидальный номера моды соответственно.

На сферическом токамаке Глобус-М [9] и далее на модернизированном токамаке Глобус-М2 [10, 11] тороидальные альфвеновские моды также наблюдались в течение продолжительного времени, и их свойства были подробно описаны. Основные результаты исследования ТАЕ в Глобусе-М/М2 приведены в следующих работах: [10, 12–15]. ТАЕ, наблюдавшиеся при низких значениях магнитного поля и тока по плазме, представляли собой короткие (до 0.5 мс) чирпированные вспышки (с уменьшающейся в течение вспышки частотой) колебаний на сигнале магнитных зондов амплитудой до 10^{-3} Тл, следующие с периодом в несколько миллисекунд. ТАЕ регистрировались в разрядах с инжекцией пучка атомов высокой энергии как на стадии роста тока (в том числе при трансформации из альфвеновских каскадов [16]), так и на стадии плато. В эксперименте наблюдались частоты ТАЕ в диапазоне от 100 до 400 кГц (в зависимости от параметров плазмы). При помощи магнитных зондов были определены номера мод n и m : на частоте первой гармоники, как правило, развивается мода $n = 1$, $m = 2, 3$. Данные диагностики доплеровского обратного рассеяния свидетельствуют о том, что чирпированные ТАЕ, регистрировавшиеся на Глобус-М и -М2, были локализованы на периферии плазмы [17]. Как и на других установках, было установлено, что на токамаке Глобус-М2 ТАЕ приводят к значительным потерям быстрых частиц [14].

Настоящая работа посвящена изучению ТАЕ, возникающих при иных условиях. В связи с увеличением магнитного поля и тока по плазме улучшилось удержание быстрых ионов, что повлияло на временную динамику моды: помимо чирпированных вспышек были зарегистрированы продолжительные моды длительностью до 5 мс, которые при определенных условиях «расщеплялись» на несколько неэквидистантных гармоник, разделенных частотным промежутком величиной порядка нескольких десятков кГц. Такая динамика моды в ряде работ объясняется доплеровским сдвигом частоты ТАЕ, связанным с наличием вращения плазмы в тороидальном направлении [18–21]. В работе проверяется применимость этой модели к данным, полученным на токамаке Глобус-М2 и проводится сравнение частоты ТАЕ и частоты тороидального вращения плазмы, опре-

деленных из спектра сигнала магнитных зондов и определенных на основе данных других диагностик. Статья организована следующим образом: в разд. 2 описываются системы нагрева и диагностики, применяемые в экспериментах, в которых наблюдаются тороидальные альфвеновские моды. В разд. 3 описываются эксперименты и условия, в которых наблюдались продолжительные ТАЕ. Раздел 4 посвящен наблюдению расщепления гармоник ТАЕ на спектре магнитного зонда и сравнению частоты первой гармоники ТАЕ, определенной из спектра, и вычисленной на радиусе локализации. Раздел 5 посвящен сравнению данных о скорости вращения плазмы, полученных из спектра магнитного зонда со скоростью вращения, измеренной диагностикой активной спектроскопии перезарядки. В последнем разд. 6 обсуждаются полученные результаты.

2. ТОКАМАК ГЛОБУС-М2: СИСТЕМЫ НАГРЕВА И ДИАГНОСТИКИ

Токамак Глобус-М2 [10, 11] – это небольшой сферический токамак с аспектным отношением $A = 1.5$ (большой радиус $R = 36$ см, малый радиус $a = 24$ см). Установка оборудована двумя инжекторами атомов, способных генерировать пучок с энергией частиц до 30 кэВ, мощностью P_{beam} до 1 МВт (НИ-1) и с энергией до 50 кэВ, мощностью до 1 МВт (НИ-2) [22], а также обширным диагностическим комплексом [23]. Для регистрации МГД-возмущений применяются массивы магнитных зондов: тороидальный и полоидальный. Тороидальный массив состоит из восьми катушек, измеряющих полоидальную компоненту магнитного потока. Катушки тороидального массива установлены за графитовыми пластинами, которыми облицована вакуумная камера, что одновременно защищает их от тепловых потоков и позволяет регистрировать электромагнитное излучение высокой частоты. Полоидальный массив состоит из 28 зондов, установленных вдоль полоидального обхода в тонкостенных трубках. Для определения поляризации колебаний используется трехкоординатный зонд. Для определения пространственной локализации (профиля) электрического поля возмущений на токамаке Глобус-М2 применяется микроволновый рефлектометр доплеровского обратного рассеяния (ДОР) [17, 23], установленный со стороны слабого магнитного поля. Зондирование плазмы осуществляется на фиксированных частотах

излучения обыкновенной моды, соответствующих различным положениям отсечки. Квадратурное $I-Q$ детектирование позволяет одновременно регистрировать амплитуду и фазу рассеянного излучения. Используются четырехчастотная схема с фиксированными частотами (20, 29, 39 и 48 ГГц), применяющаяся для зондирования периферийной области, а также 6-частотная схема (50, 55, 60, 65, 70, 75 ГГц) для зондирования центральных областей плазмы [24]. Положение радиуса отсечки для каждой из частот зондирования определяется в зависимости от условий эксперимента.

Для определения скорости тороидального вращения плазмы на токамаке Глобус-М2 применяется [23, 25] диагностика активной спектроскопии перезарядки (CXRS), основанная на регистрации излучения примесных ионов, эмиссия которого происходит в результате их перезарядки на нейтралах инжектируемого в плазму атомного пучка высокой энергии. Диагностика CXRS позволяет определять локальные значения ионной температуры (по уширению контура спектральной линии), а также скорости тороидального вращения плазмы (по смещению положения спектральной линии). Диагностика CXRS на токамаке Глобус-М2 обладает широким спектральным диапазоном

430–800 нм. Для измерений используется линия излучения водородоподобного иона углерода $C5+$ на длине волны 529.05 нм, что обусловлено тем, что в качестве материала первой стенки используется графит. Результирующее спектральное разрешение составляет 0.0024 нм/пиксель, что соответствует аппаратной погрешности измерения скорости вращения 1.36 км/с. Временное разрешение составляет 5 мс [25]. Пространственное разрешение определяется оптической системой сбора света, обеспечивающей измерения в семи пространственных точках, расположенных в экваториальной плоскости вдоль линии инжекции атомного пучка высокой энергии NBI-1 [23, 25, 26] (рис. 1).

Электронная температура и концентрация измеряются при помощи диагностики томсоновского рассеяния лазерного излучения, обеспечивающей измерение этих параметров в 10 пространственных точках с частотой 330 Гц [23, 27].

3. НАБЛЮДЕНИЕ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНЫХ ТАЕ

Качественно взаимодействие ТАЕ с частицами может быть описано с помощью модели «хищник–жертва»: быстрые ионы вступают в резонанс

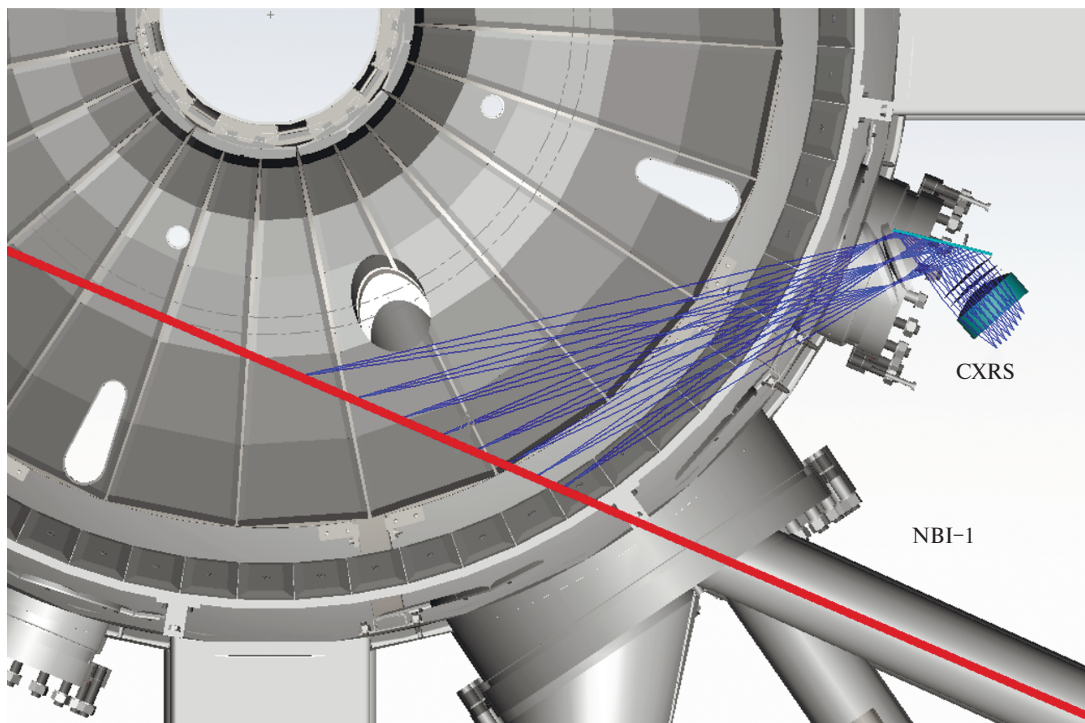


Рис. 1. Расположение линий наблюдения диагностики CXRS на токамаке Глобус-М2 относительно оси инжекции атомного пучка НИ-1 (NBI-1)

с альфвеновской модой, что приводит к стремительному росту ее амплитуды за короткий промежуток времени, а это, в свою очередь, приводит к перераспределению фракции быстрых частиц в фазовом пространстве или к их потерям. Уход резонансных частиц из фазового объема приводит к диссипации возмущения, вследствие чего в большинстве экспериментов наблюдается вспыхивающий характер развития моды. Чирпирование всплесков объясняется с точки зрения модели, предложенной в работе Берка (H. L. Berk) и Брейзмана (B. N. Breizman) — так называемая ВВ-модель [28], и определяется формой функции распределения быстрых частиц и инкрементом неустойчивости.

С увеличением магнитного поля в токамаке Глобус-М2 до значений 0.6–0.9 Тл по сравнению с 0.4–0.5 Тл в токамаке Глобус-М, и тока плазмы до значений 300–400 кА с 180–250 кА, улучшилось удержание быстрых частиц [15], являющихся основным источником энергии для альфвеновских мод, что привело к изменению динамики поведения амплитуды и частоты ТАЕ во времени. Если раньше ТАЕ, как правило, были представлены в виде непродолжительных всплесков длительностью порядка 0.1–0.5 мс, частота которых менялась во времени (chirping-ТАЕ), то при больших значениях магнитного поля и тока,

развитие моды чаще происходит по другому сценарию. Изначально, при работе одного или двух инжекторов, начинают развиваться chirping-ТАЕ, аналогичные тем, которые возникают в разрядах с низкими значениями магнитного поля и тока. Однако затем происходит переход к сценарию, при котором альфвеновская мода существует на фиксированной частоте ТАЕ в течение продолжительного времени (порядка 1–5 мс). Такое изменение может быть объяснено с точки зрения той же модели хищник–жертва, как и для отдельных всплесков ТАЕ. Из-за улучшения удержания быстрых частиц, мода, возникшая в той же области пространства, уже не приводит к таким потерям частиц, которые ранее приводили к ее затуханию. В результате этого мода может существовать более продолжительное время, обладая при этом меньшей амплитудой. На рис. 2а показана спектрограмма сигнала быстродействующего МГД-зонда в разряде #43340 (0.6 Тл, 200 кА) во время одновременной работы обоих инжекторов НИ-1 и НИ-2 с разделением частот различных тороидальных гармоник по цветам. Видно, что после 140.5 мс происходит переход от чирпинг-моды к продолжительной моде. При этом продолжительная мода порождает набор из нескольких неэквидистантных по частоте гармоник с убывающей с номером n амплитудой

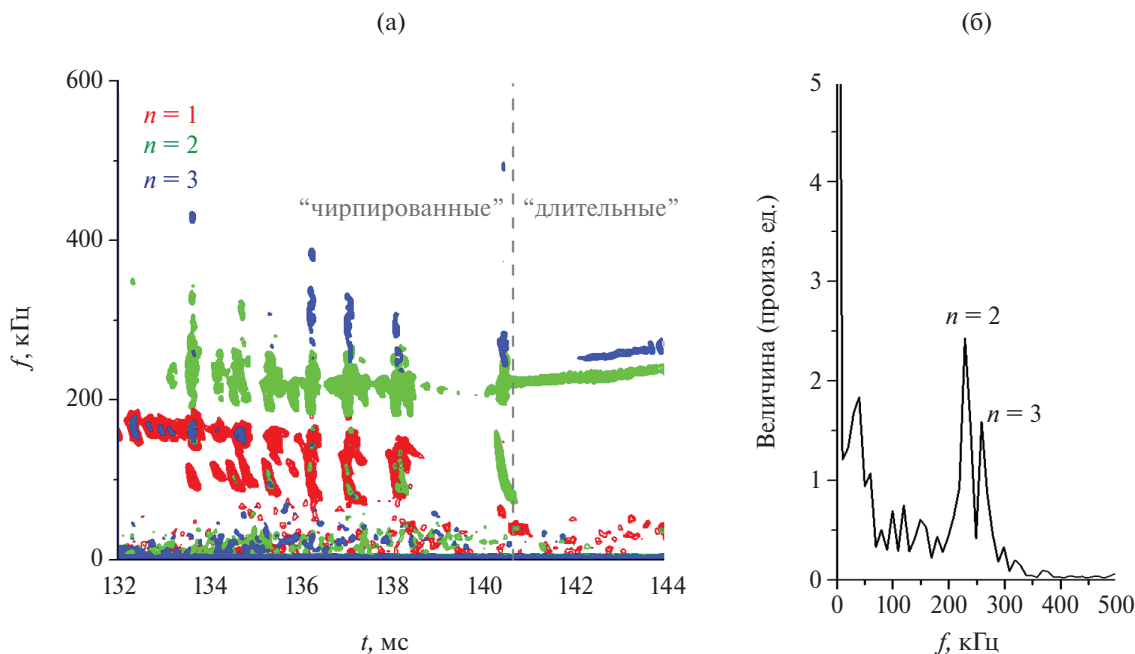


Рис. 2. Спектрограмма сигнала магнитного зонда в разряде #43340 с разделением тороидальных гармоник по цветам ($n = 1$ – красный, $n = 2$ – зеленый, $n = 3$ – синий), разделение по тороидальным числам осуществлено при помощи пространственной фурье-фильтрации (а); спектр сигнала магнитного зонда на 143 мс разряда #43340 (б).

(рис. 26). В момент времени, показанный на рис. 26 (143 мс разряда #43340) разница частот гармоник $n = 2$ и $n = 3$ составляет 29.5 кГц.

4. ВЛИЯНИЕ ТОРОИДАЛЬНОГО ВРАЩЕНИЯ ПЛАЗМЫ НА ДОППЛЕРОВСКИЙ СДВИГ ЧАСТОТЫ ТАЕ

Появление неэквидистантных гармоник может быть объяснено «расщеплением» частоты моды за счет эффекта Доплера [18], вызванного вращением плазмы в тороидальном направлении. Полоидальное вращение при этом, как и предсказывает неоклассическая теория [19], в токамаке Глобус-М2 полностью подавлено в центральных областях плазмы, что подтверждается измерениями при помощи диагностики доплеровского обратного рассеяния, и не вносит вклад в доплеровский сдвиг частоты альфвеновской моды. Так как частота ТАЕ (1) не зависит от тороидального номера n в явном виде, а зависит от q , то моды, обладающие различными n , развивающиеся в одной области пространства (при одинаковом q), не будут различимы по частоте. Однако наличие тороидального вращения плазмы будет приводить к появлению доплеровского сдвига регистрируемой частоты, при этом для мод с различными номерами n этот сдвиг будет различный, так как тороидальная компонента волнового вектора пропорциональна n ($k_\varphi = n / R_0$), где R_0 — большой радиус токамака. Такое расщепление описывается [19, 21] выражением (3), где f_n^{lab} — частота, регистрируемая зондом, f_0^{TAE} — частота первой гармоники ТАЕ в отсутствии вращения, n — тороидальный номер моды, а $f_{Doppler}^{TAE}$ — доплеровский сдвиг наблюдаемой частоты

$$f_n^{lab} = f_0^{TAE} + n f_{Doppler}^{TAE}. \quad (3)$$

Таким образом, определение частот хотя бы двух гармоник позволяет определить как фундаментальную частоту f_0^{TAE} , так и доплеровский сдвиг $f_{Doppler}^{TAE}$, соответствующий частоте вращения на радиусе локализации моды. Значит, наблюдение расщепления спектров ТАЕ дает возможность использовать магнитные измерения в целях диагностики скорости тороидального вращения плазмы.

Стоит отметить, что в отличие от других установок, где расщепление частоты ТАЕ (1), вызванное тороидальным вращением плазмы, наблюдалось, начиная с моды $n = 2$, в большинстве раз-

рядов токамака Глобус-М2 расщепление происходит почти всегда начиная с моды $n = 2$ (см. рис. 2а после 140.5 мс). Эту особенность можно объяснить тем, что в режимах с продолжительными ТАЕ, к моменту перехода от chirping-ТАЕ к продолжительным ТАЕ, q на радиусе локализации моды, как правило, меньше 1.5, что означает, согласно условию (2) при минимально возможном $m = 1$, что тороидальное число n должно быть больше единицы.

Частота вращения, полученная из магнитных измерений, сравнивалась с частотой вращения плазмы на радиусе, соответствующем максимальной интенсивности альфвеновской моды, а измеренная частота f_0^{TAE} — с частотой ТАЕ (1), также измеренной в области локализации. Для определения скорости вращения плазмы в тороидальном направлении используется диагностика CXRS, а для определения радиуса, соответствующего максимуму интенсивности альфвеновской моды, применяется рефлектометрическая диагностика ДОР.

На рис. 3 приведены профили интенсивности тороидальной моды, измеренные рефлектометром ДОР. Максимальная амплитуда сигнала ДОР для продолжительных ТАЕ регистрируется в области $R = 450$ – 500 мм. Так, например, на 143 мс разряда #43340 (рис. 2) максимум профиля интенсивности альфвеновской моды находится вблизи $R = 475$ мм. При этом для chirping-ТАЕ наблюдается преимущественно периферийная локализация. Тот факт,

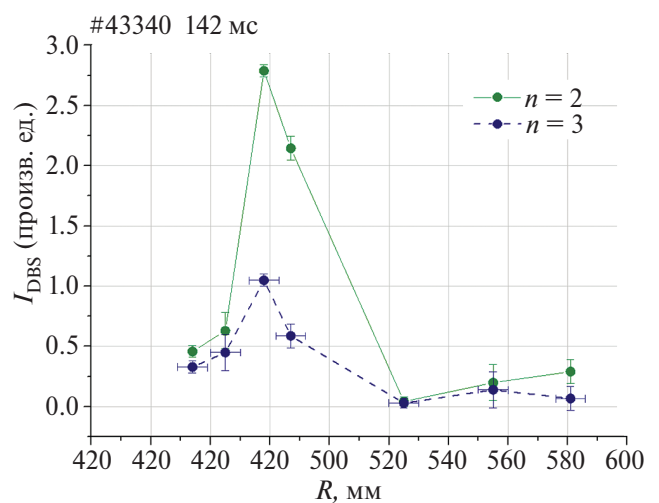


Рис. 3. Профили интенсивности сигнала ДОР для различных тороидальных гармоник ($n = 2$ — зеленая сплошная линия, $n = 3$ — синяя штриховая линия) на 142 мс разряда #43340.

что обе моды на рис. 3 локализованы в одной пространственной области, говорит о том, что разница их частот не вызвана различным пространственным положением. На основании полученных данных о локализации моды и профилей электронной концентрации, по формуле (1) вычислялась частота ТАЕ f_{form}^{TAE} , которая затем сравнивалась с частотой f_0^{TAE} , определенной по спектрам сигнала магнитного зонда. Профиль запаса устойчивости вычислялся при помощи равновесного кода FCDI IT [29]. При этом для моды $n = 2$ (рис. 2) наблюдается хорошее соответствие между расчетной величиной f_{form}^{TAE} и измеренной f_0^{TAE} . На рис. 4 приведен результат сравнения частот ТАЕ, полученных двумя разными способами для разрядов #43300, #43301, #43179, #43324, #43340, #43341, #43343, #43344, #43345 (0.6 Тл), #39232, #43325, #43326 (0.7 Тл), #41809, #41813, #41815 (0.8 Тл). Измерения проводились при локальных значениях концентрации $(2-5) \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$. Частота второй гармоники f_2^{lab} отличается от расчетной f_{form}^{TAE} на величину порядка 50–70 кГц, т. е. на величину порядка удвоенного значения $f_{Doppler}^{TAE}$, что хорошо соответствует использованной модели и говорит о том, что разность частот между наблюдаемыми гармониками действительно может быть вызвана вращением плазмы в тороидальном направлении.

5. СРАВНЕНИЕ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ С ДАННЫМИ CXRS

Разность частот $f_{Doppler}^{TAE}$, определенная из спектра сигнала магнитного зонда, сопоставлялась с частотой вращения f_{CXRS} , измеренной при помощи диагностики CXRS. На рис. 5 для 142.5 мс разряда #43340 представлен профиль частоты тороидального вращения (с погрешностью), горизонтальной пунктирной линией показана измеренная частота $f_{Doppler}^{TAE}$, а черными экспериментальными точками с погрешностью показано распределение интенсивности моды $n = 2$, измеренное при помощи диагностики ДОР. Анализ большого числа разрядов с расщепляющейся частотой продолжительных ТАЕ показал, что, во-первых, частота, измеренная из спектра сигнала магнитного зонда, оказывается выше максимальной частоты вращения, измеренной в разряде. Во-вторых, то, что радиус локализации моды совпадает с областью максимального градиента скорости вращения, о чем ранее

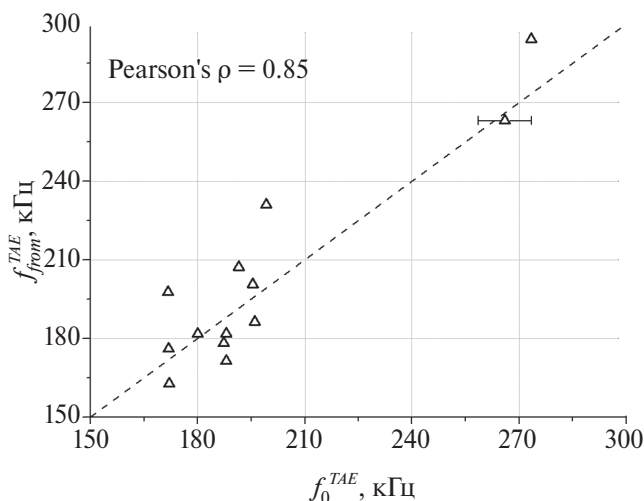


Рис. 4. Сравнение частоты продолжительных ТАЕ, полученных из спектра сигнала магнитного зонда с частотой ТАЕ на радиусе локализации моды. Коэффициент корреляции $\rho = 0.85$.

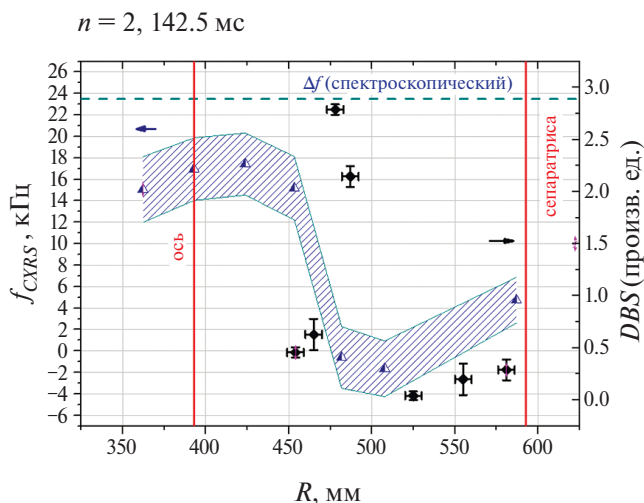


Рис. 5. Разряд #43340: профиль частоты тороидального вращения плазмы в моменты времени 142.5 мс, измеренный во время существования продолжительной ТАЕ моды (треугольники в границах погрешности с доверительным интервалом 2σ и профиль интенсивности альфвеновской моды (черные точки), измеренный при помощи рефлектометрии ДОР. Горизонтальной штриховой линией показана разность частот, полученная из магнитных измерений.

сообщалось в работе [19]. Сопоставление частот тороидального вращения, измеренных в области максимума профиля с помощью CXRS, и разности частот гармоник $n = 2$ и $n = 3$, определенной из магнитных измерений, представлено на рис. 6. Частоты вращения, измеренные двумя различными способами, сильно коррелируют между

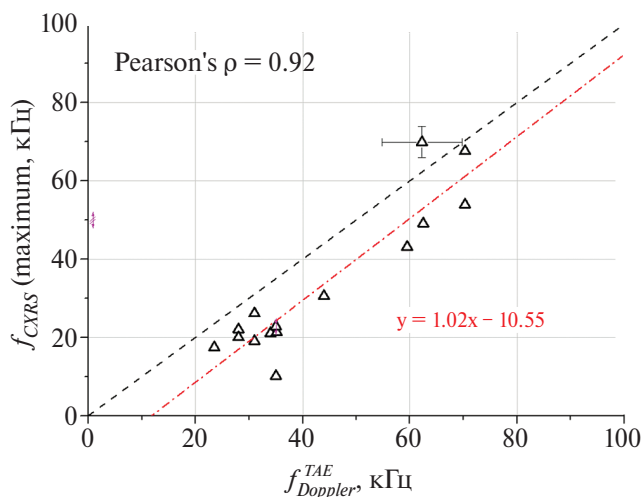


Рис. 6. Сравнение частоты вращения в области максимума профиля тороидального вращения, измеренной диагностикой CXRS от разности частот, определенной из спектра сигнала магнитного зонда. Коэффициент корреляции $\rho = 0.92$.

собой (коэффициент корреляции $\rho = 0.92$), что свидетельствует в пользу того, что наблюдаемое «расщепление» тороидальных гармоник действительно вызвано наличием тороидального вращения. При этом во всем диапазоне экспериментальных точек, частоты вращения, полученные из магнитных измерений, превышают частоты вращения, измеренные диагностикой CXRS на величину порядка 10 кГц.

6. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В качестве одной из возможных причин расхождения скоростей вращения, измеренных двумя разными способами, можно назвать отличие в скорости вращения ионов основной плазмы и частиц примеси, линия излучения которой используется для определения скорости вращения диагностикой CXRS (ионы углерода C^{5+}). Как правило, расхождение наблюдается в режимах удержания плазмы с низкой столкновительностью: «банановом» режиме и режиме «плато» [20]. Так как по данным диагностики доплеровского обратного рассеяния рассматриваемая альфвенская мода, в отличие от наблюдавшихся ранее chirping-TAE, локализована в области плазмы с высокой ионной температурой, можно предположить, что в области локализации моды реализуется режим с низкой столкновительностью. В таких режимах скорость тороидального вращения основных ионов плазмы может превы-

шать [18] скорость вращения примесных ионов на величину

$$\Delta\omega \approx \frac{3}{2} \sqrt{\epsilon} \frac{1}{en_i Z_i} \frac{dp_i}{d\Psi}, \quad (4)$$

где ϵ – обратное аспектное отношение, n_i и Z_i – концентрация и заряд ионов основной плазмы, а $dp_i / d\Psi$ – градиент ионного давления в потоковых координатах. Величины n_i и $dp_i / d\Psi$ рассчитывались при помощи транспортного кода ASTRA [30]. На рис. 7 показаны профили частоты тороидального вращения (в зависимости от малого радиуса) для разряда #42655 (0.6 Тл, 220 кА) – нескорректированный (черная сплошная линия, аппроксимирующая экспериментальные точки), и скорректированный (красная штриховая линия) на величину $\Delta\omega$ (4). Черными точками показаны измерения CXRS. Исходя из рисунка, можно сделать вывод, что разница между частотами вращения ионов примеси и основной плазмы может составлять величину порядка 5–10 кГц.

Тот факт, что частота вращения, полученная из магнитных измерений, хоть и не полностью соответствует частоте вращения плазмы, измеренной диагностикой CXRS, однако сильно коррелирует с ней, дает возможность использовать данные магнитных измерений для оценки скорости вращения. Исходя из того, что активная спектроскопия перезарядки может измерять скорость примесных ионов, а из магнитных измерений можно определять частоту вращения основных ионов, данные магнитных измерений,

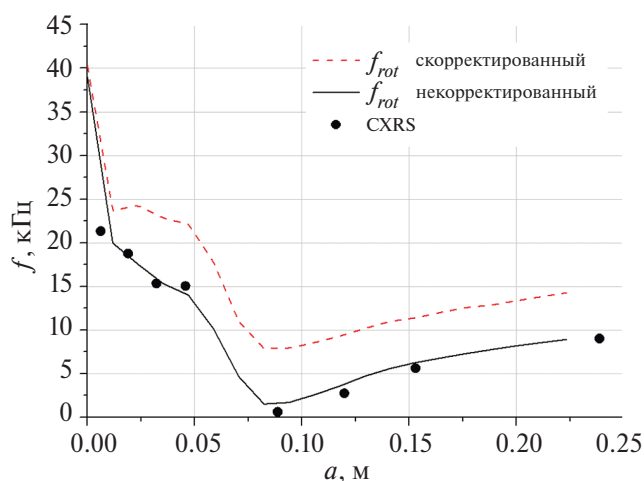


Рис. 7. Профиль скорости тороидального вращения плазмы на 152.5 мс разряда #42655. Черной сплошной линией показан нескорректированный профиль, красной штриховой линией – скорректированный на величину (4).

в разрядах, где наблюдалось расщепление ТАС, можно применять для корректировки данных CXRS.

Настоящая работа выполнена на УНУ «Сферический токамак Глобус-М» в ФТИ им. Иоффе. Разделы 2 и 3 выполнены при поддержке госзадания № FFUG-2024-0028 (диагностический комплекс) и № 0034-2021-0001 (системы нейтральной инжекции). Определение и сопоставление частот тороидальных мод (раздел 4), скоростей вращения (раздел 5), и анализ полученных результатов (раздел 6) выполнены при поддержке гранта РФФИ (проект № 21-72-20007).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fasoli A., Gormenzano C., Berk H.L., Breizman B., Briguglio S., Darrow D.S., Gorelenkov N., Heidbrink W.W., Jaun A., Kononov S.V., Nazikian R., Noterdaeme J.M., Sharapov S., Shinohara K., Testa D., Tobita K., Todo Y., Vlad G., Zonca F. // Nuclear Fusion. 2007. V. 47. P. S264. Doi: 10.1088/0029-5515/47/6/S05.
2. Wong K.L., Fonck R.J., Paul S.F., Roberts D.R., Fredrickson E.D., Nazikian R., Park H.K., Bell M., Bretz N.L., Budny R., Cohen S., Hammett G.W., Jobes F.C., Meade D.M., Medley S.S., Mueller D., Nagayama Y., Owens D.K., Synakowski E.J. // Phys. Rev. Lett. 1991. V. 66. P. 1874. Doi: 10.1103/PhysRevLett.66.1874.
3. Sharapov S.E., Alper B., Andersson F., Baranov Yu.F., Berk H.L., Bertalot L., Borba D., Boswell C., Breizman B.N., Buttery R., Challis C.D., de Baar M., de Vries P., Eriksson L.-G., Fasoli A., Galvao R., Goloborod'ko V., Gryaznevich M.P., Hastie R.J., Hawkes N.C., Helander P., Kiptily V.G., Kramer G.J., Lomas P.J., Mailloux J., Mantsinen M.J., Martin R., Nabais F., Nave M.F., Nazikian R., Noterdaeme J.-M., Pekker M.S., Pinches S.D., Pinfold T., Popovichev S.V., Sandquist P., Stork D., Testa D., Tuccillo A., Voitsekhovich I., Yavorskij V., Young N.P., Zonca F., JET-EFDA Contributors and the MAST Team // Nuclear Fusion. 2005. V. 45. P. 1168. Doi: 10.1088/0029-5515/45/9/017.
4. Heidbrink W.W., Strait E.J., Doyle E., Sager G., Snider R.T. // Nuclear Fusion. 1991. V. 31. P. 1635. Doi: 10.1088/0029-5515/31/9/002.
5. Fredrickson E.D., Bell R.E., Darrow D.S., Fu G.Y., Gorelenkov N.N., LeBlanc B.P., Medley S.S., Menard J.E., Park H., Roquemore A.L., Heidbrink W.W., Sabbagh S.A., Stutman D., Tritz K., Crocker N.A., Kubota S., Peebles W., Lee K.C., Levinton F.M. // Phys. Plasmas. 2006. V. 13. P. 056109. Doi: 10.1063/1.2178788.
6. Heidbrink W.W. // Phys. Plasmas. 2008. V. 15. P. 055501. Doi: 10.1063/1.2838239.
7. Gorelenkov N.N., Pinches S.D., Toi K. // Nuclear Fusion. 2014. V. 54. P. 125001. Doi: 10.1088/0029-5515/54/12/125001.
8. Wong K.-L. // Plasma Phys. Controlled Fusion. 1999. V. 41. P. R1. Doi: 10.1088/0741-3335/41/1/001.
9. Gusev V.K., Golant V.E., Gusakov E.Z., D'yachenko V.V., Irzak M.A., Minaev V.B., Mukhin E.E., Novokhatskii A.N., Podushnikova K.A., Razdobarin G.T., Sakharov N.V., Tregubova E.N., Uzlov V.S., Shcherbinin O.N., Belyakov V.A., Kavin A.A., Kostsov Yu.A., Kuz'min E.G., Soikin V.F., Kuznetsov E.A., Yagnov V.A. // Technical Phys. 1999. V. 44. P. 1054. Doi: 10.1134/1.1259469.
10. 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., Kavin 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., Tukhmenova 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. Doi: 10.1088/1741-4326/ac27c7.
11. 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., Kononov 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. // Nuclear Fusion. 2022. V. 57. P. 066047. Doi: 10.1088/1741-4326/aa69e0.
12. Петров Ю.В., Патров М.И., Гусев В.К., Иванов А.Е., Минаев В.Б., Сахаров Н.В., Толстяков С.Ю., Курскиев Г.С. // Физика плазмы. 2011. Т. 37. С. 1075.
13. 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. P. 515810601. Doi: 10.1017/S0022377815001129.
14. 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.* // Plasma Phys. Control. Fusion. 2021. V. 63. P. 125036.
15. *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. 2019. Т. 45. С. 675.
Doi: 10.1134/S0367292119080080.
 16. *Balachonkov I.M., Petrov Yu.V., Gusev V.K., Bakharev N.N., Bulanin V.V., Varfolomeev V.I., Zhil'tsov N.S., Kiselev E.O., Kurskiev G.S., Minaev V.B., Patrov M.I., Petrov A.V., Ponomarenko A.M., Sakharov N.V., Tel'nova A.Yu., Tokarev V.A., Khromov N.A., Shchegolev P.B., Yashin A.Yu.* // Technical Phys. Lett. 2020. V. 46. P. 1157.
Doi: 10.1134/S1063785020120032.
 17. *Bulanin V.V., Gusev V.K., Kurskiev G.S., Minaev V.B., Patrov M.I., Petrov A.V., Petrov Yu.V., Yashin A.Yu.* // Technical Phys. Lett. 2019. V. 45. P.1107.
Doi: 10.1134/S1063785019110051.
 18. *Strait E.J., Heidbrink W.W., Turnbull A.D.* // Plasma Phys. Control. Fusion. 1993. V. 36. P. 1211.
Doi: 10.1088/0741-3335/36/7/008.
 19. *Podestà M., Bell R.E., Bortolon A., Crocker N.A., Darrow D.S., Diallo A., Fredrickson E.D., Fu G.-Y., Gorelenkov N.N., Heidbrink W.W., Kramer G.J., Kubota S., LeBlanc B.P., Medley S.S., Yuh H.* // Nuclear Fusion. 2012. V. 52. P. 094001.
Doi: 10.1088/0029-5515/52/9/094001.
 20. *Kim Y.B., Diamond P.H., Groebner R.J.* // Phys. Fluids B: Plasma Phys. 1991. V. 3 P. 2050.
Doi: 10.1063/1.859671.
 21. *Podestà M., Bell R.E., Fredrickson E.D., Gorelenkov N.N., LeBlanc B.P., Heidbrink W.W., Crocker N.A., Kubota S., Yuh H.* // Phys. Plasmas. 2010. V. 17. P. 122501.
Doi: 10.1063/1.3524288.
 22. *Щеголев П.Б., Минаев В.Б., Тельнова А.Ю., Варфоломеев В.И., Гусев В.К., Есипов Л.А., Жильцов Н.С., Колмогоров В.В., Кондаков А.А., Курские Г.С., Мирошников И.В., Панасенков А.А., Сорокин А.В., Шиховцев И.А.* // Физика плазмы. 2023. Т. 49. С. 1293.
Doi: 10.31857/S0367292123601261.
 23. *Петров Ю.В., Багрянский П.А., Балаченков И.М., Бахарев Н.Н., Брунков П.Н., Варфоломеев В.И., Воронин А.В., Гусев В.К., Горяинов В.Ю., Дьяченко В.В., Ермаков Н.В., Жилин Е.Г., Жильцов Н.С., Иваненко С.В., Ильясова М.В., Кавин А.А., Киселев Е.О., Коновалов А.Н., Крикунов С.В., Курские Г.С., Мельник А.Д., Минаев В.Б., Минеев А.Б., Мирошников И.В., Мухин Е.Е., Новохацкий А.Н., Петров А.В., Пономаренко А.М., Сахаров Н.В., Скрекель О.М., Соломахин А.Е., Солоха В.В., Тельнова А.Ю., Ткаченко Е.Е., Токарев В.А., Толстяков С.Ю., Тюхменева Е.А., Хилькевич Е.М., Хромов Н.А., Чернышев Ф.В., Шевелев А.Е., Щеголев П.Б., Шулятьев К.Д., Яшин А.Ю.* // Физика плазмы. 2023. Т. 49. С. 1249.
Doi: 10.31857/S036729212360084X.
 24. *Bulanin V.V., Balachonkov I.M., Varfolomeev V.I., Gusev V.K., Kurskiev G.S., Minaev V.B., Patrov M.I., Petrov A.V., Petrov Yu.V., Ponomarenko A.M., Telnova A.Yu., Shchegolev P.B., Yashin A.Yu.* // Technical Phys. Lett. 2021. V. 47. P. 197.
Doi: 10.1134/S1063785021020206.
 25. *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.: Confer. Ser. 2019. V. 1400. P. 077018.
Doi: 10.1088/1742-6596/1400/7/077018.
 26. *Тельнова А.Ю., Мирошников И.В., Митранкова М.М., Бахарев Н.Н., Гусев В.К., Жильцов Н.С., Киселев Е.О., Курские Г.С., Минаев В.Б., Петров Ю.В., Сахаров Н.В., Щеголев П.Б., Тюхменева Е.А.* // Письма ЖТФ. 2021. Т. 47. С. 25.
Doi: 10.21883/PJTF.2021.09.50903.18618.
 27. *Курские 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.
Doi: 0.21883/PJTF.2021.24.51799.19019.
 28. *Berk H.L., Breizman V.N., Petviashvili N.V.* // Phys. Lett. A. 1997. V. 234. P. 213.
Doi: 10.1016/S0375-9601(97)00523-9.
 29. *Корнев П.С., Коньков А.Е., Митришкин Ю.В., Балаченков И.М., Киселев Е.О., Минаев В.Б., Сахаров Н.В., Петров Ю.В.* // Письма ЖТФ. 2023. Т.49. С. 36.
Doi: 10.21883/PJTF.2023.07.54920.19468.
 30. *Pereverzev G.* ASTRA — Automated System for Transport Analysis in a Tokamak. / Pereverzev G.V., Yushmanov P.N. San Diego, 2002. 147 p.

EFFECT OF PLASMA TOROIDAL ROTATION ON TOROIDAL ALFVEN EIGENMODE SPECTRUM IN GLOBUS-M2 SPHERICAL TOKAMAK

I. M. Balachenkov^{a,*}, Yu. V. Petrov^a, V. K. Gusev^a, N. N. Bakharev^a, N. S. Zhiltsov^a, G. S. Kurskiev^a, V. B. Minaev^a, I. V. Miroshnikov^a, A. M. Ponomarenko^b, N. V. Sakharov^a, A. Yu. Telnova^a, E. E. Tkachenko^a, P. B. Shchegolev^a, and A. Yu. Yashin^b

^a*Ioffe institute, Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, 194064 Russia*

^b*Peter the Great state Polytechnical University, St. Petersburg, 195251 Russia*

**e-mail: balachenkov@mail.ioffe.ru*

In experiments with neutral beam injection on the Globus-M2 spherical tokamak, sequences of long-lasting harmonics of toroidal Alfvén modes were discovered, equidistant from each other in frequency and shifted from zero by a constant value. Using microwave Doppler backscattering diagnostics, the central localization of toroidal modes was determined. In this work, the possibility of “splitting” of toroidal harmonics due to the Doppler shift caused by the toroidal rotation of the plasma is being discussed. It is found that the unshifted frequency of the toroidal Alfvén mode obtained from the spectrum of the magnetic probe signal is in good agreement with the frequency of the mode calculated at the mode location radius, and the toroidal rotation frequency, also determined from the spectrum of the magnetic probe signal, correlates well with the rotation frequency measured using charge exchange spectroscopy diagnostics, but differs by a constant amount. Possible reasons for the discrepancies are being discussed.

Keywords: toroidal Alfvén modes, toroidal plasma rotation, spherical tokamak