

04

## Обнаружение альфвеновских колебаний на токамаке Глобус-М с использованием метода обратного доплеровского рассеяния

© В.В. Буланин<sup>1</sup>, В.К. Гусев<sup>2</sup>, Г.С. Курскиев<sup>2</sup>, В.Б. Минаев<sup>2</sup>,  
М.И. Патров<sup>2</sup>, А.В. Петров<sup>1</sup>, М.А. Петров<sup>1</sup>, Ю.В. Петров<sup>2</sup>,  
А.Ю. Тельнова<sup>2</sup>, А.Ю. Яшин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

<sup>2</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург  
E-mail: V.Bulanin@spbstu.ru

Поступило в Редакцию 26 июля 2017 г.

Для исследования альфвеновских колебаний в плазме токамаков впервые применен метод доплеровского обратного рассеяния (ДОР). В ходе исследований на сферическом токамаке Глобус-М с помощью ДОР удалось зарегистрировать колебания скорости вращения плазмы на альфвеновской частоте. Определена область развития альфвеновской неустойчивости. Измерение амплитуды колебаний скорости вращения позволило оценить абсолютные значения амплитуд колебаний электрического и магнитного поля альфвеновских колебаний в области их существования в объеме плазменного разряда в токамаке.

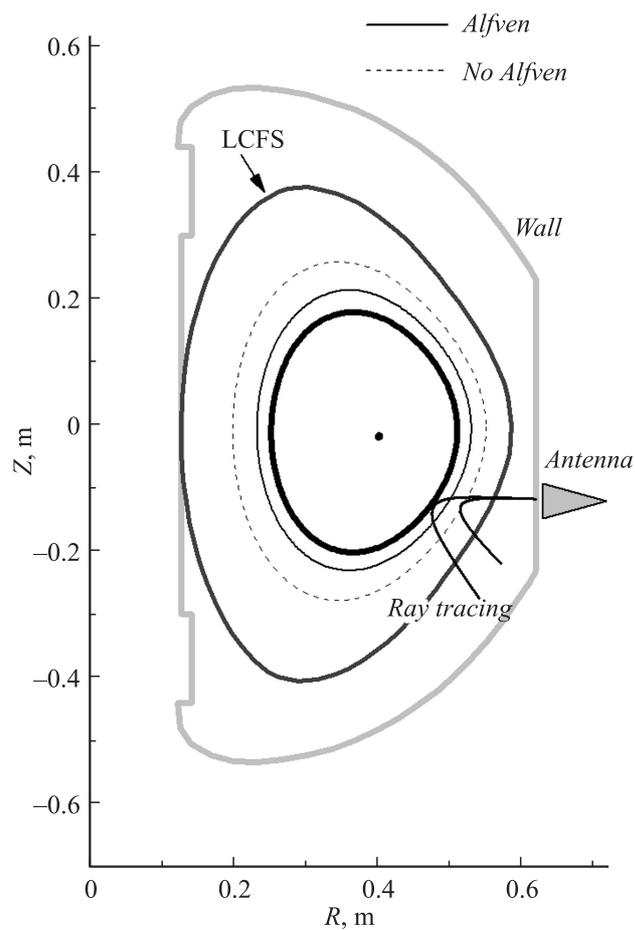
DOI: 10.21883/PJTF.2017.23.45274.16986

Наличие в плазме тороидальных установок значительной фракции ионов высокой энергии может приводить к возбуждению альфвеновских колебаний [1,2]. Возникающие при этом возмущения магнитного поля негативно влияют на удержание быстрых ионов плазмы, что уменьшает эффективность будущих термоядерных установок [3,4]. В связи с этим продолжается интенсивное исследование альфвеновской неустойчивости, в том числе с привлечением новых диагностических методов.

Традиционно альфвеновские колебания регистрируются и исследуются с помощью магнитных зондов. Данный метод позволяет обнаружить переменные во времени возмущения магнитного поля вне разряда и определить частоты колебаний и их модовый состав. Наряду

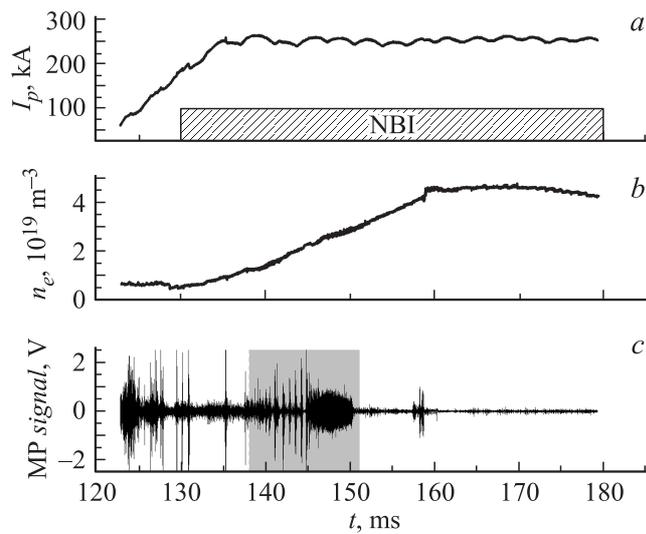
с магнитной диагностикой используются диагностики, позволяющие регистрировать альфвеновские колебания в центральных областях тороидальных установок. С помощью СВЧ-рефлектометрии удавалось зарегистрировать смещения отсечки, вызванные колебаниями электронной плотности на альфвеновской частоте [5]. Методом спектроскопии зондирующего пучка тяжелых ионов (НВР) были экспериментально обнаружены колебания электрического потенциала плазмы, которые сопровождали колебания магнитного поля в альфвеновской волне [6]. Колебания регистрировались также при измерении излучения на второй гармонике электрон-циклотронной частоты [7]. В настоящей работе приводятся первые результаты исследований альфвеновских колебаний с помощью метода доплеровского обратного рассеяния (ДОР).

Метод ДОР основан на регистрации обратно рассеянного на флуктуациях электронной плотности СВЧ-излучения, падающего наклонно на поверхность отсечки [8–12]. Диагностика позволяет по доплеровскому сдвигу обратно рассеянного излучения  $\Delta\omega$  определить величину скорости вращения флуктуаций плазмы в направлении дрейфа плазмы в радиальном электрическом поле  $V_{\perp} = \Delta\omega/k_{\perp}$  (здесь  $\perp$  — волновое число рассеивающих флуктуаций плотности плазмы вблизи отсечки). В общем случае эта скорость представляет собой скорость  $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$  дрейфа и фазовую скорость рассеивающих флуктуаций [10]. Обратно рассеянное излучение регистрируется преимущественно из области отсечки, что обеспечивает локальность измерений [13]. На токамаке Глобус-М зондирование методом ДОР осуществлялось волной обыкновенной поляризации, при этом частота зондирующего излучения перестраивалась в пределах 27–38 GHz. Специфика применения ДОР на сферическом токамаке со значительным углом наклона силовых линий и широм магнитного поля детально обсуждается в [14]. Наклон антенны потребовалось осуществлять не только в полоидальном, но и в тороидальном направлении. Определение положения отсечки и величины волнового числа  $k_{\perp}$  проводилось в приближении геометрической оптики [14]. Пример построения лучевых траекторий приведен на рис. 1. Характерные волновые числа рассеивающих флуктуаций плазмы  $k_{\perp}$  находились в пределах 3–5  $\text{cm}^{-1}$ . Для приема рассеянного излучения применялось квадратурное детектирование. Сигналы квадратурного детектора преобразовывались с помощью аналого-цифрового преобразователя с частотой дискретизации 4 МГц.



**Рис. 1.** Построение лучевых траекторий для разряда № 36646 для моментов времени  $t = 141$  и  $149$  ms. Сплошными линиями обозначены магнитные поверхности, на которых наблюдались колебания скорости вращения, штриховой — поверхность, на которой колебания отсутствовали. LCFS — последняя замкнутая магнитная поверхность.

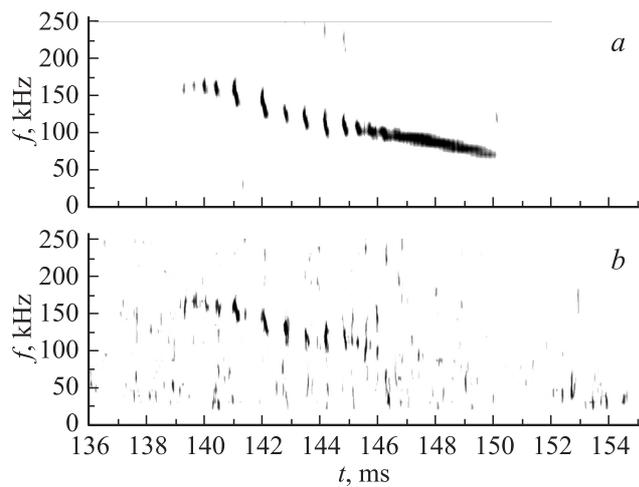
Возможность регистрации альфвеновских колебаний методом ДОР определяется тем, что альфвеновские колебания являются электромаг-



**Рис. 2.** Осциллограммы для разряда № 36646: *a* — ток по плазме (заштрихована область действия нейтральной инжекции), *b* — среднехордовая электронная плотность, *c* — сигнал быстрого магнитного зонда (серым цветом отмечена область развития альфвеновских колебаний). МР — магнитный зонд.

нитными волнами, и осцилляции электрического поля в альфвеновской волне приводят к колебаниям скорости  $\mathbf{E} \times \mathbf{V}$  дрейфа, что может быть зарегистрировано по изменениям доплеровского сдвига рассеянного излучения на альфвеновской частоте. На существование колебания электрического поля на альфвеновской частоте указывают колебания потенциала, обнаруженные методом НВР [6].

Исследования проводились в дейтериевой плазме на токамаке Глобус-М с дополнительным нагревом путем инжекции быстрых атомов (NBI) при следующих параметрах разряда:  $I_p = 250$  кА,  $\bar{n}_e < 5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ ,  $B_T = 0.5$  Т. Инжекция пучка нейтральных атомов дейтерия с энергией  $E_a = 27$  кВ и мощностью  $P_{\text{NBI}} = 700$  кВт проводилась на начальной стадии разряда во время роста тока. Условия разряда были схожи с теми, при которых альфвеновские колебания наблюдались в предыдущих экспериментах [4,15]. Характерные осциллограммы основных параметров разряда и сигнала магнитного зонда приведены на



**Рис. 3.** Спектрограммы альфвеновских колебаний для разряда № 36646: *a* — спектрограмма колебаний магнитного поля, *b* — спектрограмма колебаний скорости вращения.

рис. 2. В разряде, представленном на рис. 2, альфвеновские колебания наблюдались на сигналах магнитного зонда (рис. 2, *c*) в виде уединенных всплесков (139–145 ms) и квазинепрерывных колебаний (145–150 ms). Для более детального частотного анализа в интервале 139–150 ms была построена спектрограмма колебаний магнитного поля с определением спектров в окне  $128 \mu\text{s}$  и временным шагом вычисления спектров  $32 \mu\text{s}$  (рис. 3, *a*). Ранее колебания такого типа на токамаке Глобус-М интерпретировались как тороидальные альфвеновские моды (ТАЕ) [4,15], образующиеся в частотных зазорах альфвеновского континуума с характерной частотой  $f_{\text{ТАЕ}} = \frac{V_A}{4\pi qR}$ , где  $q$  — коэффициент запаса устойчивости,  $R$  — большой радиус, а  $V_A = \frac{B}{\sqrt{\mu_0 \rho_D}}$  — альфвеновская скорость,  $B$  — магнитное поле,  $\rho_D$  — массовая плотность ионов плазмы.

В том же временном интервале 139–150 ms исследовались колебания скорости вращения, определенные методом ДОР. На рис. 3, *b* приведена спектрограмма скорости вращения, вычисленная с теми же параметрами, что и для колебаний магнитного поля. Видно, что спектрограмма колебаний скорости с большой точностью повторяет

Сводка экспериментальных значений амплитуд колебаний для различных вспышек разряда № 36646

$t, \text{ms}$	$f, \text{kHz}$	$\tilde{V}_\perp, \text{km/s}$	$\tilde{E}_r, \text{kV/m}$	$\tilde{B}_\theta, 10^{-4} \text{T}$	$\tilde{B}_\theta^{\text{MP}}, 10^{-4} \text{T}$
142.0	160	3.7	1.2	9.2	1.1
142.7	139	4.5	1.5	11.5	0.9
143.4	135	3.1	1.0	7.8	1.3
144.1	128	4.0	1.3	10.1	1.6
144.7	126	3.2	1.1	8.2	1.7
145.2	116	2.4	0.8	6.2	1.5

спектрограмму колебаний магнитного поля до момента времени 145 ms. Наблюдаемое исчезновение колебаний скорости в спектрах со 145 ms может быть связано со смещением области отсечки на периферию разряда при повышении плотности плазмы (рис. 2, *b*) в область с меньшей амплитудой альфвеновских колебаний. С использованием данных диагностики томсоновского рассеяния и реконструкции магнитных поверхностей с помощью кода EFIT были построены две лучевые траектории соответствующие отсечкам магнитные поверхности для двух последовательных моментов времени: 141 и 149 ms (рис. 1). Момент времени 141 ms близок к моменту начала возникновения и наблюдения колебаний (магнитная поверхность изображена жирной сплошной линией). В момент времени 149 ms колебания скорости уже не регистрировались методом ДОР; соответствующая этому времени магнитная поверхность изображена штриховой линией. Магнитная поверхность, соответствующая концу наблюдения флуктуаций скорости (145 ms) построена путем интерполяции между моментами времени 141 и 149 ms (отмечена тонкой сплошной линией). Таким образом, колебания регистрировались в интервале радиусов  $R = 50\text{--}53 \text{ cm}$ . Основываясь на данных расчета по коду EFIT и результатах измерений плотности методом томсоновского рассеяния, можно полагать, что колебания скорости на альфвеновской частоте наблюдались при плотности в области отсечки  $1.5 \cdot 10^{19} \text{ m}^{-3}$  и меняющемся при смещении отсечки значении коэффициента запаса устойчивости  $q = 1.6\text{--}2.0$ . Результаты расчетов частоты колебаний ТАЕ по приведенной выше формуле с использованием значений  $q$  и  $\rho_D$  в отсечке демонстрируют удовлетворительное

согласие с экспериментальными значениями частоты. Конечно, для детального сравнения требуется использовать данные о локализации и частотах колебаний, полученные путем моделирования. При этом можно полагать, что метод ДОР с использованием многочастотного зондирования позволит обеспечить необходимые для сравнения сведения о локализации колебаний.

С учетом того, что наблюдаемые колебания скорости представляют собой колебания дрейфа в радиальном электрическом поле альфвеновской волны, была оценена амплитуда колебаний радиального электрического поля  $\tilde{E}_r = \tilde{V}_\perp B$ . По известной величине радиального электрического поля можно определить амплитуду колебаний магнитного поля  $\tilde{B}_\theta = \tilde{E}_r / c_A$ . Данные об амплитудах колебаний скорости, радиального электрического и магнитного полей сведены в таблицу для ряда всплесков альфвеновских колебаний. В таблице указаны времена возникновения всплесков колебаний и частоты, соответствующие началу всплеска. Значения  $\tilde{V}_\perp$ ,  $\tilde{E}_r$ ,  $\tilde{B}_\theta$  определялись как максимумы огибающих, которые вычислялись с использованием преобразования Гильберта. В таблице приведены также значения магнитных полей  $\tilde{B}_\theta^{\text{MP}}$ , определенные с помощью магнитного зонда, расположенного на стенке вакуумной камеры. Видно, что с момента времени 144.1 ms наблюдается спад уровня колебаний магнитного поля  $\tilde{B}_\theta$ , связанный, видимо, со смещением отсечки на периферию в область с меньшими локальными значениями электрического поля  $\tilde{E}_r$ .

Следует отметить, что колебания доплеровского сдвига могут быть обусловлены также вариацией угла падения зондирующего излучения, обусловленной деформацией магнитной поверхности в области объема рассеяния при возникновении альфвеновской волны. В предположении, что амплитуда колебаний радиальной  $\tilde{B}_r$  и полоидальной  $\tilde{B}_\theta$  компонент магнитного поля сравнимы, при известной величине  $B_\theta$  вариации угла наклона можно оценить как  $\Delta\alpha \sim \tilde{B}_r / B_\theta \sim \tilde{B}_\theta / B_\theta \sim 10^{-2}$ . Ожидаемые амплитуды колебания скорости в этом случае составят величину  $\Delta V \sim 10^{-2} \langle V \rangle$ , где  $\langle V \rangle$  — средняя скорость вращения плазмы. В эксперименте эта величина составляет малую долю ( $10^{-2}$ ) от реально измеренной амплитуды колебаний скорости.

Таким образом, впервые с использованием ДОР были зарегистрированы колебания скорости вращения плазмы на альфвеновской частоте. Возможность прямой оценки скорости вращения позволила оценить амплитуды колебаний электрического и магнитного полей в альфве-

новской волне в объеме разряда. Колебания наблюдались в диапазоне радиусов 50–53 см. При больших радиусах, на периферии разряда, колебаний не наблюдалось. Для проверки существования альфвеновских колебаний в центральных областях, при меньших радиусах, требуется расширение диапазона зондирующих частот, которое оптимально осуществить с использованием многочастотной схемы диагностики.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 17-12-01177).

## Список литературы

- [1] *Heidbrink W.W.* // Phys. Plasmas. 2008. V. 15. P. 055501.
- [2] *Gorelenkov N.N., Pinches S.D., Toi K.* // Nucl. Fusion. 2014. V. 54. P. 125001
- [3] *Fredrickson E.D., Bell R.E.* et al. // Phys. Plasmas. 2006. V. 13. P. 056109.
- [4] *Petrov Yu.V., Gusev V.K., Patrov M.I.* et al. // J. Plasma Phys. 2015. V. 81. P. 515810601.
- [5] *Podesta M., Bell R.E.* et al. // Nucl. Fusion. 2012. V. 52. P. 094001.
- [6] *Melnikov A.V., Eliseev L.G.* et al. // Nucl. Fusion. 2012. V. 52. P. 123004.
- [7] *Van Zeeland M.A., Kramer G.J.* et al. // Phys. Rev. Lett. 2006. V. 97. P. 135001.
- [8] *Буланин В.В., Лебедев С.В., Левин Л.С.* и др. // Физика плазмы. 2000. Т. 26. № 10. С. 867–873.
- [9] *Hirsch M., Holzhauser E.* et al. // Plasma Phys. Control. Fusion. 2001. V. 43. P. 1641.
- [10] *Conway G.D.* et al. // Plasma Phys. Control. Fusion. 2005. V. 47. P. 1165.
- [11] *Hennequin P., Honore C., Truc A.* et al. // Nucl. Fusion. 2006. V. 46. P. 771.
- [12] *Hillesheim J.C.* et al. // Nucl. Fusion. 2015. V. 55. P. 073024.
- [13] *Буланин В.В., Ефанов М.В.* // Физика плазмы. 2006. Т. 32. № 1. С. 49–57.
- [14] *Yashin A.Y., Bulanin V.V., Petrov A.V.* et al. // J. Instrum. 2015. V. 10. P. 10023.
- [15] *Петров Ю.В., Патров М.И., Гусев В.К.* и др. // Физика плазмы. 2011. Т. 37. № 12. С. 1075–1080.