

04

Влияние тороидальных альфвеновских мод на удержание быстрых частиц в сферическом токамаке Глобус-М

© Ю.В. Петров, Н.Н. Бахарев, В.К. Гусев, В.Б. Минаев,
В.А. Корнев, А.Д. Мельник, М.И. Патров, Н.В. Сахаров,
С.Ю. Толстяков, Г.С. Курскиев, Ф.В. Чернышев, П.Б. Щёголев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
E-mail: yu.petrov@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 17 сентября 2014 г.

При инжекции нейтрального пучка в токамак Глобус-М на ранней стадии разряда возбуждались неустойчивости в диапазоне частот 50–200 kHz, которые были идентифицированы как ТАЕ (Toroidal Alfvén Eigenmode) [2]. Влияние данных мод на удержание быстрых частиц наблюдалось с помощью анализатора атомов перезарядки (NPA) и нейтронного детектора. Для изучения изотопного эффекта использовались водород и дейтерий как в инжектируемом пучке, так и в качестве плазмы-мишени. Как показал корреляционный анализ сигналов магнитных зондов, возникающие моды в большинстве своем имеют в составе одну гармонику с тороидальным номером $n = 1$. При инжекции дейтерия в дейтериевую плазму развитие ТАЕ приводило к уменьшению нейтронного потока до 25%, при этом потоки атомов перезарядки высоких энергий уменьшались на 75%. При инжекции водорода снижение измеряемых NPA потоков не превышало 25%.

В экспериментах с инжекцией пучка нейтральных атомов на ранней стадии разряда токамака Глобус-М [1] наблюдались неустойчивости, возбуждаемые быстрыми ионами в диапазоне частот 50–200 kHz, которые были идентифицированы как тороидальные альфвеновские моды (ТАЕ) [2]. В последних опытах для изучения изотопного эффекта в качестве инжектируемого пучка и плазмы-мишени были использованы водород и дейтерий. На рис. 1 показаны спектрограммы сигналов зондов Мирнова. Из приведенных спектров виден разный характер поведения моды для разных изотопов. При инжекции дейтерия (2 верхних спектра на рис. 1) мода развивается в виде коротких вспышек длительностью порядка 0.5 ms с быстрым падением частоты в течение

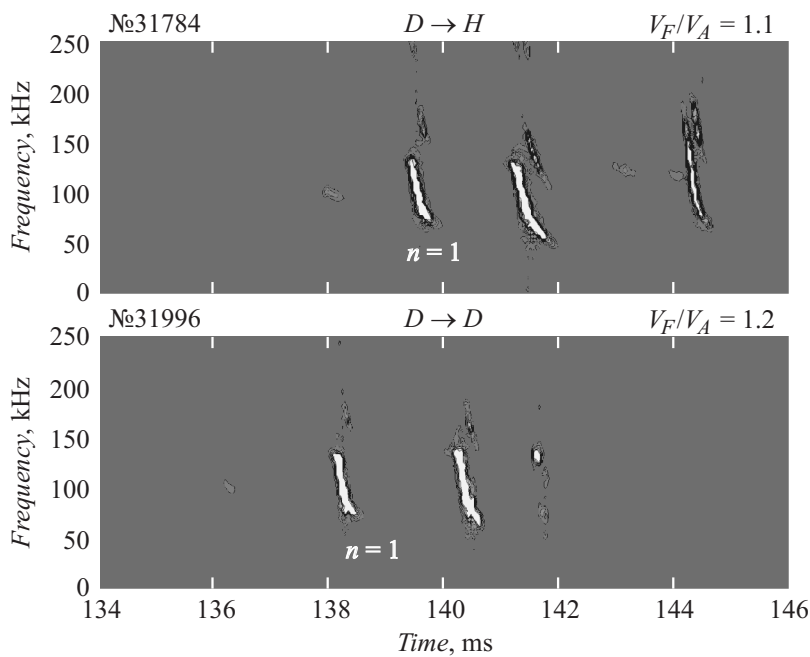


Рис. 1. Спектрограммы сигнала зондов Мирнова с разными сочетаниями изотопов пучок-плазма. Буквами *D* и *H* указаны изотопы инжектируемого пучка и плазмы-мишени.

вспышки, так называемых chirping modes. Такой характер развития, по-видимому, описывается моделью „хищник–жертва“, согласно которой развитие неустойчивости приводит к потерям быстрых частиц, ее вызывающих, и частота моды падает, чтобы сохранить эффективную передачу энергии от частиц к волне. При инъекции водорода (2 нижних спектра на рис. 1) мода начиналась с коротких вспышек, а затем, как правило, перерастала в долгоживущую моду с примерно постоянной амплитудой, что обусловлено, вероятно, лучшим удержанием протонов по сравнению с дейтронами и соответственно меньшими потерями протонов при развитии моды (о чем речь пойдет ниже). Как видно из рис. 1, частота ТАЕ во всех 4 случаях остается примерно в том же диапазоне ~ 100 kHz, за исключением случая инъекции водорода

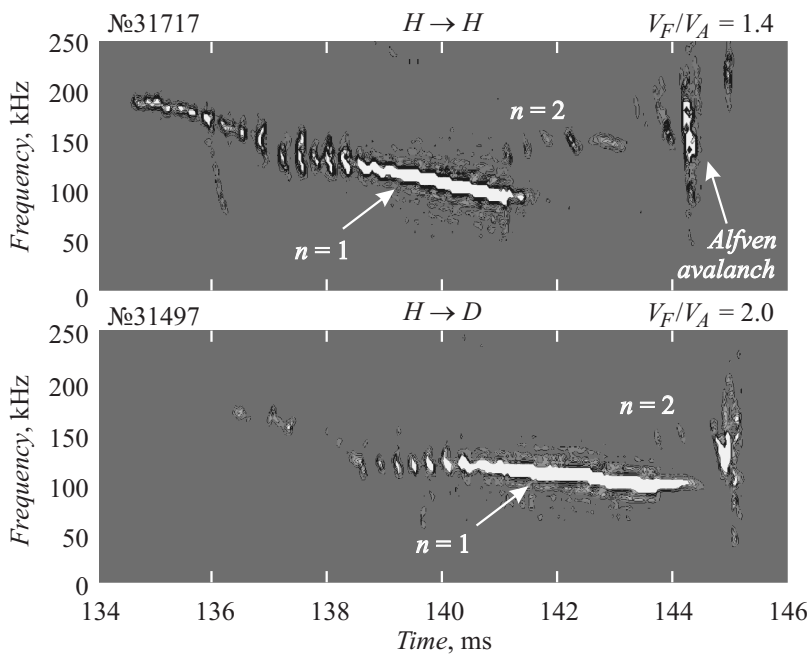


Рис. 1 (продолжение).

в водородную плазму, когда первые вспышки моды наблюдаются при существенно большей частоте. Однако основная интенсивная мода по-прежнему развивается на частоте ~ 100 kHz.

Проведенный корреляционный анализ сигналов 4 быстрых зондов показал, что в подавляющем большинстве случаев развивающиеся возмущения имеют одномодовый состав с тороидальным номером $n = 1$, что укладывается в представления линейной теории [3,4], согласно которой максимальное тороидальное число ТАЕ в токамаке определяется как $n_{\max} = \frac{r\omega_{cf}}{q^2V_A}$, где r — малый радиус, а ω_{cf} — циклотронная частота быстрых частиц. Для условий токамака Глобус-М величина n_{\max} порядка 1–1.5. Только иногда появляется слабая мода с $n = 2$, характер поведения которой отличается от характера поведения ТАЕ. На 2 нижних спектрах рис. 1 обозначены эти моды с растущей во времени частотой, являющиеся, по-видимому, альфвеновскими каскадами. В отдельных

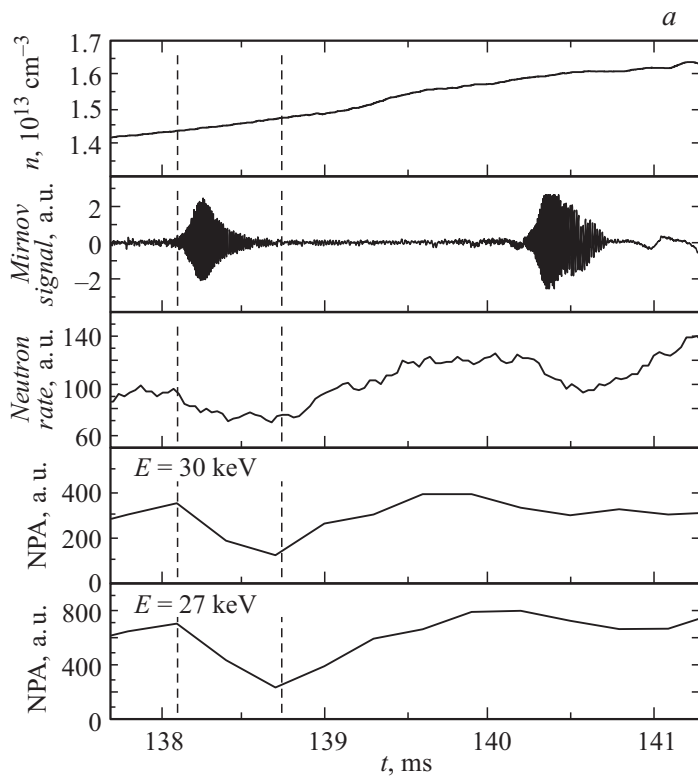


Рис. 2. *a* — осциллограммы плотности, магнитных колебаний, нейтронного потока и потоков атомов перезарядки в разряде № 31996 с ТАЕ; *b* — спектры атомов перезарядки до (138.1 ms) и после (138.7 ms) возникновения ТАЕ.

сильных вспышках моды удалось определить полоидальное число m с помощью набора 26 полоидально распределенных зондов. Во всех случаях оно оказалось равным 3.

В описываемой в серии экспериментов благодаря улучшению временного разрешения диагностики впервые на Глобусе-М была установлена корреляция между развитием ТАЕ и потерями быстрых частиц. Влияние указанных мод на удержание быстрых частиц регистрировалось с помощью тангенциально направленного анализатора потоков

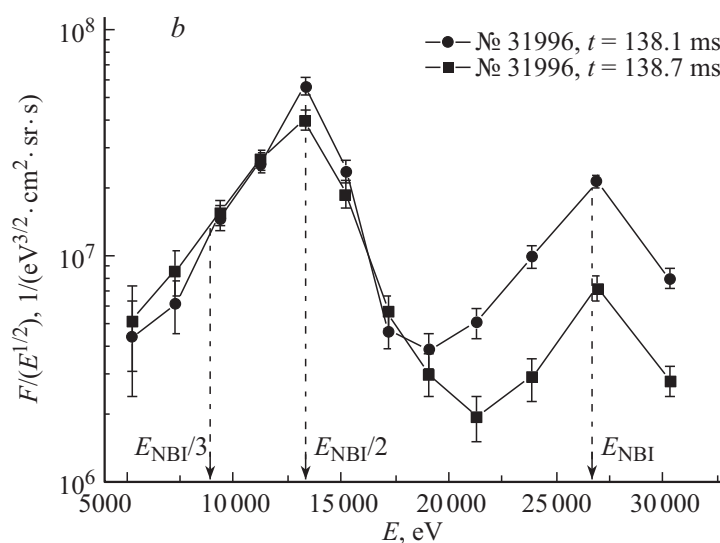


Рис. 2 (продолжение).

атомов перезарядки (NPA) и нейтронного детектора. Наибольшие потери были зарегистрированы при инжекции дейтерия. На рис. 2, *a* приведены осциллограммы разряда № 31996. Из рисунка видно, что всплескам ТАЕ (сигнал зонда Мирнова) соответствуют провалы нейтронного потока и потоков атомов перезарядки с энергиями, близкими к энергии инжекции, которая составляла 27 keV. На рис. 2, *b* показаны энергетические спектры атомов перезарядки в момент перед началом моды (138.1 ms) и в минимуме провала (138.7 ms). Видно, что наибольшим потерям подвержены частицы с энергией инжекции (на 75%), провал распространяется до энергий 18 keV (соответствующей альфвеновской скорости для текущих параметров плазмы), уменьшаясь в относительной мере. Аналогичный провал наблюдается на осциллограмме потока нейтронов. Была измерена зависимость падения интенсивности нейтронных потоков (рис. 3, *a*) и атомов перезарядки с энергией вблизи энергии инжекции (рис. 3, *b*). Обе зависимости демонстрируют рост потерь при увеличении интенсивности моды с тенденцией к насыщению при больших значениях. Потоки нейтронов уменьшаются не более

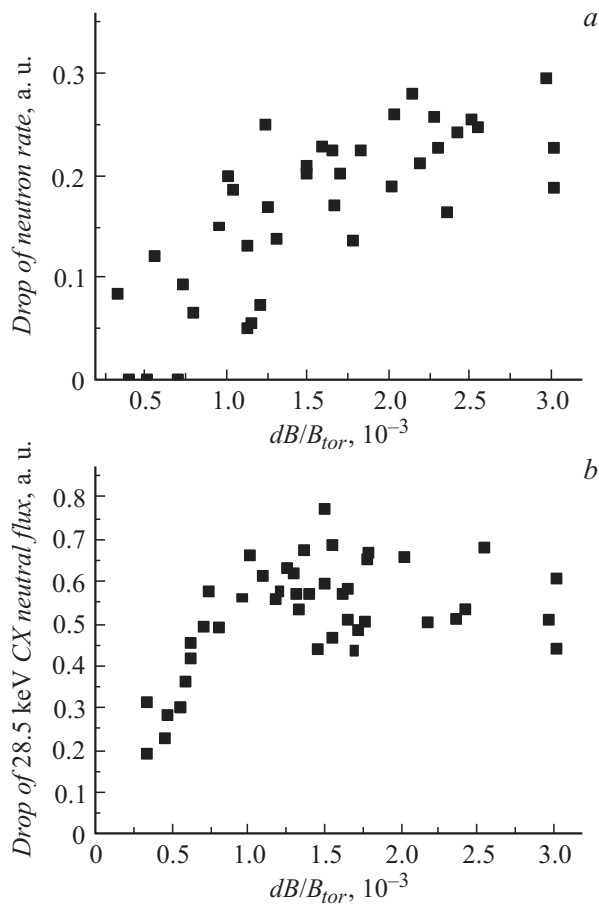


Рис. 3. Доля потерь нейтронов (а) атомов перезарядки с энергией 28.5 keV (b) в зависимости от относительной амплитуды альфвеновской моды.

чем на 25–30%, что, по-видимому, соответствует реальным потерям быстрых частиц при развитии ТАЕ либо уменьшению их энергии вследствие торможения при взаимодействии с модой. В то же время потоки атомов перезарядки в области энергии инжекции уменьшаются значительно сильнее, что может быть объяснено либо уходом быстрых

частиц из центральной зоны на периферию, либо изменением их питч-угла (разворотом в пространстве скоростей) таким образом, что они перестают попадать в анализатор. Во всех остальных случаях, кроме инжекции дейтерия в дейтериевую плазму, нейтронный поток отсутствует, поэтому о потерях частиц можно судить только по потокам атомов перезарядки. В случае инжекции дейтерия в водородную плазму возбуждались такие же сильные моды, как и при инжекции дейтерия в дейтерий, что приводило к еще большему провалу в потоках атомов перезарядки больших энергий. Другая картина наблюдается при инжекции водорода. Во-первых, интенсивность возникающих ТАЕ в среднем ниже, чем при инжекции дейтерия. Во-вторых, потери быстрых частиц, отражаемые в уменьшении потоков атомов перезарядки в области энергии инжекции, существенно ниже. При развитии долгоживущей моды наблюдалось лишь плавное снижение потоков не более чем на 20%. Даже в случае самых сильных вспышек моды провал в потоках не превышал 25%. Меньшая величина потерь протонов по сравнению с дейтронами, по-видимому, связана с меньшей шириной орбиты, которая, в свою очередь, определяется ларморовскими радиусами в полном и полоидальном магнитных полях. Эти величины для дейтронов с энергией 30 keV в условиях описанных выше экспериментов ($B_t = 0.4$ Т, $I_p = 200$ кА), согласно орбитальным расчетам [5], составляют величины порядка 10 и 25 см соответственно, что соизмеримо с малым радиусом токамака. При этом, как мы наблюдали в экспериментах, такие дейтроны испытывают большие потери при развитии ТАЕ.

Интересно оценить, какие потери при развитии ТАЕ будут испытывать дейтроны в компактных термоядерных источниках нейтронов на базе сферического токамака. В качестве примера рассмотрим проект ТИН-СТ с параметрами, взятыми из работы [6]: $R = 50$ см, $a = 30$ см, $B = 1.5$ Т, $I_p = 1.5$ МА, $n_e = 10^{20}$ м⁻³, энергия пучка атомов дейтерия 130 keV. Отношение величин ларморовского радиуса ТИН-СТ (ρ^{TNS}) и Глобус-М (ρ^{Globus}) можно выразить формулой:

$$\frac{\rho^{TNS}}{\rho^{Globus}} = \frac{B^{Globus} \sqrt{E^{TNS}}}{B^{TNS} \sqrt{E^{Globus}}},$$

где B^{Globus} , B^{TNS} — магнитные поля, E^{Globus} , E^{TNS} — энергии инжекции дейтронов в Глобусе-М и ТИН-СТ соответственно. Подстановка в формулу приведенных выше параметров дает значение отноше-

ния 0.55. Учитывая несколько большие размеры ТИН-СТ по сравнению с Глобус-М, можно ожидать, что потери дейтронов, связанные с развитием ТАЕ в ТИН-СТ, будут меньше. Однако окончательный ответ на этот вопрос могут дать только эксперименты в условиях, приближенных к условиям ТИН-СТ. В качестве последовательных шагов можно рассматривать эксперименты на модернизированном токамаке Глобус-М2 с тороидальным полем 1 Т и током по плазме 500 кА, а затем и на водородном прототипе, токамаке Глобус-М3, с параметрами, близкими к ТИН-СТ.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (Соглашение № 14.619.21.0001 от 15.08.2014, уникальный идентификатор проекта RFMEFI61914X0001).

Список литературы

- [1] *Gusev V.K., Azizov E.A., Alekseev A.B. et al. // Nucl. Fusion. 2013. V. 53. P. 093 013.*
- [2] *Петров Ю.В., Патров М.И., Гусев В.К. и др. // Физика плазмы. 2011. Т. 37. № 12. С. 1075–1080.*
- [3] *Cheng C.Z., Chance M.S. // Phys. Fluids. 1986. V. 11. P. 3695.*
- [4] *Berk H.L., Breizman B.N., Ye H. // Phys. Lett. A. 1992. V. 162. P. 475.*
- [5] *Чернышев Ф.В., Афанасьев В.И., Гусев В.К. и др. // Физика плазмы. 2011. Т. 37. № 7. С. 595–615.*
- [6] *Азизов Э.А., Минеев А.Б. // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2012. В. 2. С. 5–20.*