Транспорт и потери ионов высокой энергии, инициированные тороидальными альфвеновскими модами на токамаках Глобус-М/М2 [[1]](#footnote-1)\*)

Бахарев Н.Н., Балаченков И.М., Варфоломеев В.И., Гусев В.К., Забродский В.В., Ильясова М.В., Киселев Е.О., Корнев В.А., Курскиев Г.С., Мельник А.Д., Минаев В.Б., Миронов М.И., Мирошников И.В., Петров Ю.В., Пономаренко А.М., Сахаров Н.В., Скрекель О.М., Тельнова А.Ю., Токарев В.А., Тюхменева Е.А., Хилькевич Е.М., Хромов Н.А., Чернышев Ф.В., Шевелев А.Е., Щеголев П.Б., Яшин А.Ю.

ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

В работе представлен обзор мультидиагностических исследований транспорта и потерь ионов высокой энергии во время тороидальных альфвеновских мод (TAE - Toroidal Alfvén Eigenmode) [1] на токамаках Глобус-М/М2 [2]. TAE является кандидатом на роль самой опасной неустойчивости для удержания быстрых частиц в будущих термоядерных установках. Тороидальные альфвеновские моды, возбуждаемые популяцией МэВных альфа-частиц, рождаемых в ядерной реакции синтеза дейтерия и трития, могут приводить к катастрофическим последствиям. Основная опасность заключается в том, что взаимодействие альфвеновских волн с быстрыми частицами может провоцировать их аномальный транспорт на периферию, создавая локальные нагрузки на стенку токамака, а также снижая эффективность нагрева плазмы и генерации токов увлечения. Экспериментальные исследования TAE на существующих классических токамаках требуют создания специфических условий разряда для возбуждения альфвеновских волн. На сферических токамаках Глобус-М/М2 эти неустойчивости появлялись в рутинных экспериментах с дополнительным нагревом. Они приводили к потере до 30% ионов высокой энергии [3], транспорту более половины быстрых частиц из центральной области плазмы [4], а также к существенному нагреву стенки.

Токамаки Глобус-М/М2 оснащены богатым набором диагностик, позволяющих изучать удержание быстрых частиц, куда входят нейтронные детекторы [5]; анализаторы атомов перезарядки с центральными и периферийными линиями наблюдения [6]; твердотельные детекторы, регистрирующие теряемые частицы; зонд Ленгмюра и быстрая инфракрасная камера. Локализация и структура самой моды может быть получена с использованием диагностики допплеровской рефлектометрии [7] и набора высокочастотных магнитных зондов. Полученные с помощью этих диагностик экспериментальные данные, а также моделирование взаимодействия частиц с волной были использованы для исследования механизмов транспорта быстрых ионов; локальности потерь во времени и пространстве; ширины области резонанса; особенностей эволюции моды во времени из-за взаимодействия с быстрыми ионами и фоновой плазмой; зависимости потерь быстрых частиц от амплитуды моды, тороидального магнитного поля и тока плазмы и особенностей удержания быстрых частиц при TAE в компактных сферических токамаках. Проведенный анализ позволяет дать благоприятный прогноз для будущих установок.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 21-72-20007.

Литература

1. N.N. Bakharev et al. Submitted to Nuclear Fusion 2022
2. V. B. Minaev et al 2017 Nucl. Fusion 57 066047
3. N.N. Bakharev et al 2015 Nucl. Fusion 55 043023
4. Yu.V. Petrov et al 2015 J. Plasma Phys. 81 515810601
5. M.V. Iliasova et al. NIM A 1029 (2022) 166425
6. N.N. Bakharev et al 2021 Plasma Phys. Control. Fusion 63 125036
7. Yu.V. Petrov et al 2019 Plasma Phys.Rep. 45 723–731

1. \*) [DOI – тезисы на английском](http://www.fpl.gpi.ru/Zvenigorod/L/R/en/KP-Bakharev_e.docx) [↑](#footnote-ref-1)