

04.2

Влияние временных характеристик колебаний геодезической акустической моды на возможность инициирования LH-перехода в токамаке ТУМАН-3М

© А.А. Белокуров¹, Г.И. Абдуллина¹, Л.Г. Аскинази¹, В.В. Буланин², Н.А. Жубр¹, В.А. Корнев¹,
С.В. Крикунов¹, С.В. Лебедев¹, А.В. Петров², Д.В. Разуменко¹, А.С. Тукачинский¹, А.Ю. Яшин²

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: belokurov@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 29 марта 2019 г.

В окончательной редакции 29 марта 2019 г.

Принято к публикации 29 апреля 2019 г.

Наблюдения колебаний геодезической акустической моды (ГАМ) в токамаке ТУМАН-3М показывают, что в омических разрядах с низкой концентрацией плазмы ГАМ имеют перемежающийся характер; переходу в режим улучшенного удержания предшествует короткая (до 5 ms) серия всплесков ГАМ с явным спадом частоты или существует длительная (около 30 ms) серия всплесков ГАМ с меняющейся амплитудой. Для определения влияния временных характеристик ГАМ на возможность инициирования перехода в режим улучшенного удержания проведено численное моделирование эволюции профиля концентрации под воздействием последовательности всплесков ГАМ с меняющейся частотой и амплитудой.

Ключевые слова: плазма, токамак, H-мода, геодезическая акустическая мода, ГАМ.

DOI: 10.21883/PJTF.2019.15.48087.17814

Режим улучшенного удержания плазмы, или так называемая H-мода, является необходимым операционным режимом в установках для удержания термоядерной плазмы. H-мода характеризуется наличием периферийного транспортного барьера — области, в которой подавлен аномальный (или турбулентный) перенос тепла и частиц. Подавление турбулентности происходит за счет существования сильной радиальной неоднородности (так называемого шира) радиального электрического поля E_r и скорости полоидального вращения плазмы [1]. Таким образом, если создать сильно неоднородное радиальное электрическое поле, оказывается возможным инициировать переход в режим улучшенного удержания (LH-переход). Существуют явления в плазме, при которых возникает подобное сильно неоднородное поле E_r , например колебания геодезической акустической моды (ГАМ) [2].

Геодезическая акустическая мода — специфический вид низкочастотных колебаний радиального электрического поля и концентрации в тороидальной плазме. ГАМ не участвует непосредственно в радиальном переносе, при этом колебания ГАМ раскачиваются за счет нелинейного взаимодействия с высокочастотной частью спектра дрейфовой турбулентности и создают сильную неоднородность E_r и скорости полоидального вращения, тем самым воздействуют на аномальный перенос, регулируя уровень турбулентности, и таким образом могут привести к LH-переходу.

Шир E_r , создаваемый ГАМ, непостоянен во времени, поэтому временные характеристики колебаний ГАМ могут влиять на возможность инициирования LH-перехода.

Согласно теоретическим представлениям, зональные потоки, ГАМ и турбулентность взаимосвязаны посредством механизма, описываемого системой уравнений типа „хищник–жертва“ [3]. В некоторых случаях наблюдается поведение ГАМ и турбулентности, соответствующее колебаниям предельного цикла: так называемая I-фаза, представляющая собой промежуточное квазистационарное состояние удержания с перемежающейся сильной активностью ГАМ и турбулентностью, была обнаружена в токамаке ASDEX-Upgrade [4]. Из I-фазы возможен выход в H-моду, если среднее радиальное электрическое поле нарастает достаточно для создания самоподдерживающегося транспортного барьера [5,6]. Механизмы связи ГАМ, медленных зональных потоков и турбулентности в связи с улучшением удержания и переходом в H-моду продолжают активно изучаться [7]. Тем не менее даже при отсутствии явных колебаний предельного цикла может наблюдаться взаимодействие ГАМ и турбулентности с различными характерными временами.

В токамаке ТУМАН-3М в разрядах с низкой концентрацией ($n < (0.6–1.0) \cdot 10^{19} \text{ m}^{-3}$) и омическим LH-переходом обычно наблюдается сильная активность ГАМ в фазе омического удержания, исчезающая сразу после LH-перехода, иногда наиболее сильные всплески ГАМ непосредственно предшествуют LH-переходу [7,8]. Необходимо отметить, что в таком диапазоне значений концентрации возможен только LH-переход, инициированный приложенным извне сильным неоднородным полем E_r (в отличие от спонтанного LH-перехода при более высоких концентрациях). В рассматриваемых раз-

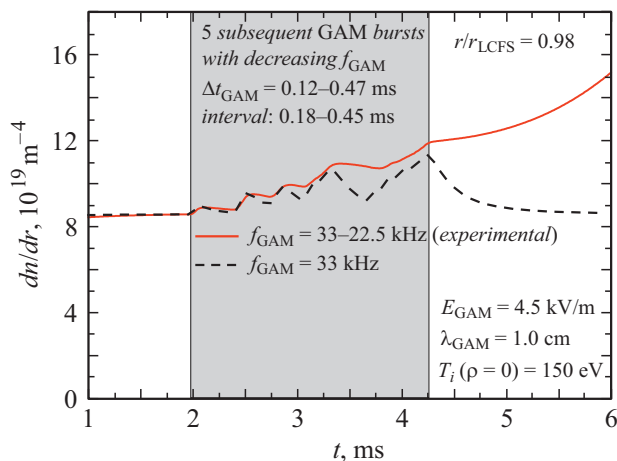


Рис. 1. Модельная эволюция периферийного градиента концентрации плазмы в сценарии со спадающей частотой ГАМ: серия вспышек длительностью 0.12–0.47 ms с промежутками 0.18–0.45 ms приводит к инициированию ЛН-перехода (сплошная линия). Штриховой линией показана эволюция для аналогичного сценария с постоянной частотой; спад частоты определяет возможность инициирования ЛН-перехода.

рядом подобного воздействия на плазму нет, поэтому предполагается, что именно ГАМ является фактором, инициирующим ЛН-переход; возможность такого инициирования, согласующаяся с экспериментом, была описана в [9]. В токамаке ТУМАН-3М наблюдается два характерных сценария разрядов с ГАМ перед ЛН-переходом.

В первом случае можно рассматривать отдельную короткую серию вспышек ГАМ общей длительностью менее 3 ms, после которой происходит ЛН-переход, при этом в течение серии имеет место спад частоты колебаний ГАМ с 33 kHz до примерно 22.5 kHz [7]. Колебания потенциала наблюдались с помощью диагностического пучка тяжелых ионов (ДПТИ), отдельные вспышки ГАМ внутри серии имели длительность 0.2–1.0 ms.

Во втором случае активность ГАМ присутствует в течение почти всей фазы L-моды с постоянной частотой в виде серий вспышек модулированной амплитуды с периодом около 5 ms, при этом внутри каждой серии вспышки ГАМ существуют в течение примерно 0.2 ms с периодом 0.8–1.0 ms [8]. Наблюдения проводились методом доплеровского обратного рассеяния (ДОР). В экспериментах помимо регистрации колебаний радиального электрического поля на частоте ГАМ регистрировались также колебания уровня турбулентных флуктуаций. На обоих временных масштабах в данном сценарии (отдельных вспышек ГАМ и серий вспышек) увеличение уровня турбулентности и усиление активности ГАМ происходит в противофазе, что свидетельствует о сложном взаимодействии фоновой турбулентности и ГАМ.

Максимальная амплитуда колебаний ГАМ в обоих сценариях была примерно одинаковой: 4.5–5.5 kV/m (значение получено из измерений скорости полоидального вращения при помощи ДОР и из величины коле-

баний потенциала, зарегистрированных ДПТИ, с учетом данных ДОР относительно пространственных характеристик ГАМ, см. [8,9]).

Ранее для анализа возможности инициирования ЛН-перехода вспышкой колебаний ГАМ была разработана численная модель [9], рассчитывающая эволюцию профиля концентрации плазмы с учетом подавления диффузии широм E_r . В настоящей работе представлены полученные с использованием разработанной модели результаты численного моделирования экспериментальных сценариев, описанных выше. Для моделирования использовались начальные профили концентрации (для стационарной L-моды), полученные из эксперимента методом абелизации хордовых сигналов; профили ионной и электронной температуры были получены с помощью кода ASTRA с учетом условия нормировки на центральные величины температуры, определенные в аналогичных разрядах с помощью анализатора нейтральных частиц ($T_i(0)$) и диагностики мягкого рентгена ($T_e(0)$).

Согласно расчетам, проведенным в [9], более низкая частота ГАМ способствует переходу в режим улучшенного удержания. Возникает вопрос: может ли спад частоты, наблюдаемый в эксперименте [7], быть определяющим фактором, ответственным за инициирование ЛН-перехода в этом случае? В данном сценарии в течение 2.5 ms существует несколько последовательных вспышек ГАМ длительностью 0.12–0.47 ms с промежутками 0.18–0.45 ms. Каждая отдельная вспышка неспособна привести к инициированию ЛН-перехода.

Результаты моделирования первого сценария (короткая серия вспышек ГАМ с меняющейся частотой) представлены на рис. 1. В течение серии вспышек за счет подавления турбулентности увеличиваются градиент концентрации и соответственно вклад шир неоклассического поля E_r в подавление турбулентности. Если частота ГАМ спадает, эффект от каждой отдельной вспышки приводит к большему росту градиента концентрации, который не успевает релаксировать к первоначальному значению за время промежутка между вспышками. В том случае, если при всех прочих неизменных параметрах ГАМ и плазмы частота ГАМ остается постоянной, равной наибольшему значению 33 kHz, видно, что вклад каждой отдельной вспышки оказывается менее значительным, и после серии вспышек шир неоклассического радиального электрического поля не способен поддерживать транспортный барьер. Таким образом, спад частоты в течение одной серии вспышек может являться фактором, ответственным за переход в режим улучшенного удержания.

Сложная длительная эволюция ГАМ с несколькими характерными временами (вспышки длительностью 0.2 ms с периодом 1 ms, сгруппированные в серии с периодом 5 ms с меняющейся от нуля до максимума амплитудой) является следствием взаимодействия ГАМ и фоновой турбулентности [8]. Возможность ЛН-перехода в случае серии вспышек определяется тем, успевает ли градиент релаксировать за время между вспышками или

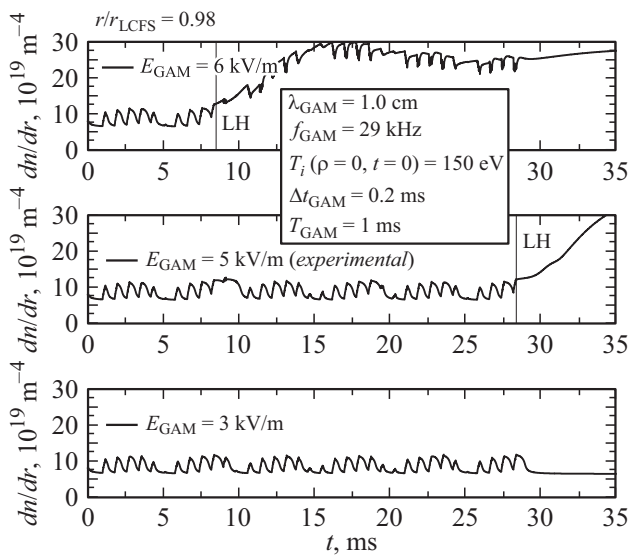


Рис. 2. Модельная эволюция периферийного градиента концентрации плазмы в сценарии со сложной временной структурой ГАМ; вспышки длительностью 0.2 ms следуют с периодом 1 ms, амплитуда ГАМ меняется от нуля до максимума с периодом 5 ms. Показана эволюция для амплитуды ГАМ 6, 5 и 3 kV/m (сверху вниз). Амплитуда ГАМ 5 kV/m близка к экспериментальной. При большей амплитуде для инициирования ЛН-перехода необходимо меньшее количество серий вспышек.

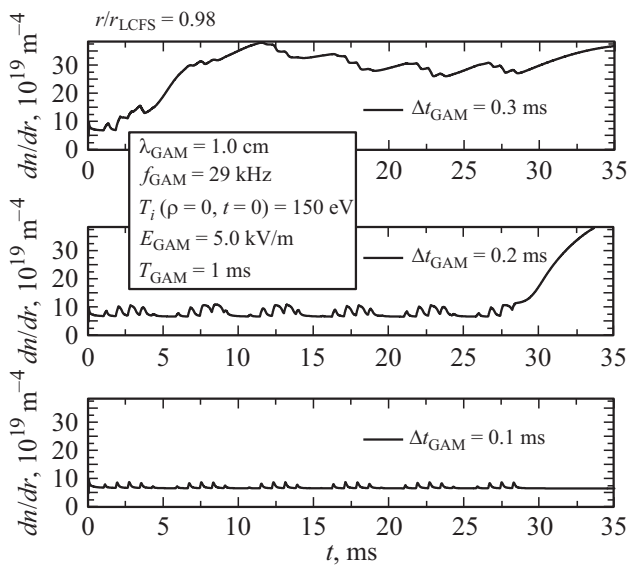


Рис. 3. Модельная эволюция периферийного градиента концентрации плазмы в сценарии со сложной временной структурой ГАМ: влияние скважности вспышек ГАМ на возможность инициирования ЛН-перехода. При большей длительности вспышки (0.3 ms) для инициирования ЛН-перехода необходимо меньшее количество серий вспышек.

происходит постепенное увеличение среднего E_r . В случае с длительной последовательностью серий вспышек релаксация происходит также за время между двумя сериями вспышек ГАМ; в связи с этим необходимо

исследовать условия, при которых такой сценарий может приводить к ЛН-переходу.

Результаты моделирования второго сценария (длительная эволюция ГАМ) представлены на рис. 2. Для экспериментальных параметров ГАМ и плазмы модельная эволюция профиля концентрации от начала активности ГАМ до момента ЛН-перехода составляет около 30 ms. Это время довольно хорошо совпадает с экспериментальным временем существования ГАМ до ЛН-перехода. Возможность инициирования ЛН-перехода зависит от максимальной амплитуды ГАМ: при более низкой амплитуде переход не наступает, при более высокой амплитуде переход происходит раньше (т.е. в течение меньшего количества серий вспышек). Исходя из результатов моделирования средний градиент концентрации на периферии в течение эволюции длительностью 30 ms возрастает на 5–7% от исходного значения. Несмотря на малость „накопленной“ величины, этого оказывается достаточно для обеспечения возможности инициирования ЛН-перехода очередной вспышкой ГАМ. Фактором, ответственным за переход, помимо свойств колебаний ГАМ (амплитуда, частота и т.д.), является скважность серии ГАМ. На рис. 3 изображена эволюция градиента концентрации в случае серий ГАМ разной скважности: длительность вспышки в течение одной серии составляет от 0.1 до 0.3 ms, период вспышек фиксирован и равен 1 ms. При большей длительности вспышек градиент релаксирует существенно медленнее, и в течение одной серии вспышек происходит усредненное нарастание градиента, достаточное для создания самоподдерживающегося E_r . При меньшей длительности (0.1 ms) величина градиента концентрации между вспышками успевает релаксировать к начальному значению.

Моделирование сценариев с сериями коротких вспышек ГАМ показало хорошее согласие с экспериментом: подтверждено влияние частоты ГАМ на возможность инициирования ЛН-перехода; сложная временная структура с несколькими характерными временами также оказывает существенное влияние на возможность ЛН-перехода. Вопрос о постепенном снижении уровня турбулентности остается открытым и требует дальнейшего исследования.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе (проведение экспериментов на токамаке ТУМАН-3М) и Российского научного фонда (численное моделирование, проект РНФ № 18-72-10028).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Biglari H., Diamond P.H., Terry P.W. // Phys. Fluids B. 1990. V. 2. N 1. P. 1–3.
- [2] Diamond P., Itoh S.-I., Itoh K., Hahm T.S. // Plasma Phys. Control Fusion. 2005. V. 47. N 5. P. R35–R162.
- [3] Kim E.-J., Diamond P.H. // Phys. Rev. Lett. 2003. V. 90. N 18. P. 185006.
- [4] Conway G.D., Angioni C., Ryter F., Sauter P., Vicente J. // Phys. Rev. Lett. 2011. V. 106. N 6. P. 065001.
- [5] Miki K., Diamond P.H., Gürçan Ö.D., Tynan G.R., Estrada T., Schmitz L., Xu G.S. // Phys. Plasmas. 2012. V. 19. N 9. P. 092306.
- [6] Tynan G.R., Cziegler I., Diamond P.H., Malkov M., Hubbard A., Hughes J.W., Terry J.L., Irby J.H. // Plasma Phys. Control. Fusion. 2016. V. 58. N 4. P. 044003.
- [7] Аскинази Л.Г., Вильдджюнас М.И., Жубр Н.А., Комаров А.Д., Корнев В.А., Крикунов С.В., Крупник Л.И., Лебедев С.В., Рождественский В.В., Tendler M., Тукачинский А.С., Хребтов С.М. // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38. В. 6. С. 29–36.
- [8] Bulanin V.V., Askinazi L.G., Belokurov A.A., Kornev V.A., Lebedev S.V., Petrov A.V., Tukachinsky A.S., Vildjunas M.I., Wagner F., Yashinet A.Yu. // Plasma Phys. Control. Fusion. 2016. V. 58. N 4. P. 045006.
- [9] Askinazi L.G., Belokurov A.A., Bulanin V.V., Gurchenko A.D., Gusakov E.Z., Kiviniemi T.P., Lebedev S.V., Kornev V.A., Korpilo T., Krikunov S.V., Leerink S., Machielsens M., Niskala P., Petrov A.V., Tukachinsky A.S., Yashin A.Yu., Zhubr N.A. // Plasma Phys. Control. Fusion. 2017. V. 59. N 1. P. 014037.