———— ТОКАМАКИ ——

УДК 533.9

ИССЛЕДОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОСТИ В ПЛАЗМЕ ТОКАМАКА ГЛОБУС-М ВО ВРЕМЯ ПЕРЕХОДА В Н-РЕЖИМ БЕЗ ПЕРИФЕРИЙНЫХ ЛОКАЛИЗОВАННЫХ МОД

© 2020 г. А. Ю. Яшин^{*a*,*,**}, В. В. Буланин^{*a*}, А. В. Петров^{*a*}, В. К. Гусев^{*b*}, Г. С. Курскиев^{*b*}, В. Б. Минаев^{*b*}, М. И. Патров^{*b*}, Ю. В. Петров^{*b*}

^а Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия ^b Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

> *e-mail: alex_yashin@list.ru **e-mail: A. Yashin@spbstu.ru Поступила в редакцию 28.10.2019 г. После доработки 19.12.2019 г. Принята к публикации 20.01.2020 г.

Представлены результаты исследования турбулентности в режимах улучшенного удержания (H-режиме) с ELMs (периферийными локализованными модами) и без них. Исследование проведено с использованием метода допплеровского обратного рассеяния на токамаке Глобус-М. Два типа ELMs наблюдались на токамаке Глобус-М при нагреве с помощью инжекции быстрых нейтральных атомов и, соответственно, обнаружены два различных перехода в режим без ELMs. Продемонстрировано, что переход из H-режима с ELMs, сопровождаемыми малыми пилообразными колебаниями, в H-режим без ELMs характеризуется падением амплитуды турбулентности на периферии, в то время как такой переход в случае ELMs, сопровождаемых большими пилообразными колебаниями, происходит без подавления периферийной турбулентности.

Ключевые слова: плазма, токамак, Н-режим, турбулентность, периферийные локализованные моды, допплеровское обратное рассеяние

DOI: 10.31857/S0367292120070100

1. ВВЕДЕНИЕ

Одним из наиболее важных вопросов на пути к термоядерной электростанции на основе токамаков является получение режима улучшенного удержания плазмы (Н-режима [1]) без больших импульсных тепловых нагрузок на стенку, известных как периферийные локализованные моды (ELMs [2]).

Свободный от ELMs режим наблюдался на всех крупных токамаках (JT-60 [3] и JET [4]) и обычно сопровождался накоплением примесей из-за уменьшения диффузии в области пьедестала.

Переход в улучшенный H-режим без ELMs с помощью осаждения лития был обнаружен на токамаке NSTX [5–7]. В этих экспериментах исчезновение ELMs сопровождалось увеличением запасенной энергии, увеличением температур электронов и ионов в пьедестале и их периферийного градиента.

"Спокойный" Н-режим (QH-режим) был получен в DIII-D с использованием инжекции пучка нейтральных атомов в направлении, противоположном току плазмы, при снижении плотности [8]. В этих разрядах получен H-режим без ELMs, который характеризовался отсутствием всплесков интенсивности излучения на линии D_{α} и импульсной тепловой нагрузки на дивертор. Благодаря наличию периферийных гармонических колебаний (EHO), перенос краевых частиц в этом режиме достаточно быстр, в связи с этим в разрядах была постоянная плотность и постоянный уровень излучаемой мощности, несмотря на отсутствие ELMs.

Обнаружено, что плазма в H-режиме ASDEX Upgrade с большим пристеночным зазором и при инжекции нейтральных атомов в направлении, противоположном току плазмы, дает длинные стационарные фазы, свободные от ELMs [9], которые практически во всех аспектах напоминают QH-режим, который наблюдался в DIII-D.

Основной целью данной работы является изучение поведения турбулентности¹ и соответствующих плазменных потоков при переходе в H-pe-

¹ Здесь и далее термин "турбулентость" означает мелкомасштабные флуктуации плотности плазмы.

жим, свободный от ELMs, на сферическом токамаке Глобус-М.

2. Н-РЕЖИМ С ELMs, СОПРОВОЖДАЕМЫМИ БОЛЬШИМИ ПИЛООБРАЗНЫМИ КОЛЕБАНИЯМИ, В ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М

Эксперименты проводились на компактном сферическом токамаке Глобус-М [10] ($R \approx 0.36$ м, $a \approx 0.24$ м, $B_{tor} = 0.4 - 0.5$ Тл, $I_p = 150 - 250$ кА, вытянутость $\kappa \approx 1.8$, треугольность $\delta \leq 0.5$, дейтериевая плазма). В качестве материала первой стенки использовался рекристаллизованный графит типа RGTi. Для обработки стенки использовалась боронизация. В экспериментах с дополнительным нагревом применялся пучок нейтральных атомов дейтерия мощностью 0.7 МВт и энергией 26-28 кэВ. Эволюцию интегральной вдоль линии наблюдения плотности электронов $\langle n_{e} \rangle$ измеряли с помощью 0.8 мм микроволнового интерферометра (вертикальная хорда, R = 0.42 м). Для измерений SXR (мягкого рентгеновского излучения) использовался широкоугольный SPD (кремниевый прецизионный детектор) с вертикальной линией наблюдения. Радиально направленная линия наблюдения детектора излучения на линии D_{α} находилась в экваториальной плоскости.

Токамак работал в режиме улучшенного удержания (Н-режим), инициированном инжекцией нейтрального пучка [11]. На рис. 1 представлена временная эволюция параметров типичного для Глобус-М Н-режима с нейтральной ижекцией. Основные параметры этого разряда были следующими: $B_{tor} = 0.4$ Тл, $I_p = 190$ кА, $q_{95} = 6$, $\langle n_e \rangle = 4 \times$ $\times 10^{19}$ м⁻³. Минимальная плотность для L-Н перехода в режиме NBI в 1.5 раза выше, чем при только омическом нагреве, из-за прямого нагрева ионов. На токамаке Глобус-М устойчивый переход в Н-режим обычно происходит через несколько миллисекунд после начала инжекции пучка [12], если средняя плотность плазмы выше 1.5×10^{19} м⁻³ [13].

ELMs можно наблюдать как вспышки на сигнале D_{α} , сопровождаемые провалами плотности. Также можно видеть, что ELMs синхронизованы с пилообразными колебаниями SXR. Каждая вспышка ELM следует за срывом пилы с временной задержкой порядка десятков микросекунд [14]. Мы полагаем, что пилообразные колебания могут увеличивать периферийный градиент плотности плазменного тока или периферийный градиент электронного давления [15] и, таким образом, делать пилинг-баллонную моду нестабильной [16].

Такой режим является стационарным, когда ток плазмы слабо меняется во времени.



Рис. 1. Временная эволюция плазменного тока I_p , электронной плотности n_e , интенсивности излучения на линии D_{α} и мягкого рентгеновского излучения (*SXR*). Низкочастотные ELMs. Вертикальная линия обозначает момент времени 192.5 мс, когда ELMs пропадают.

Если ток плазмы значительно уменьшается, амплитуда пилообразных колебаний резко падает. Это приводит к исчезновению ELMs. Излучение D_{α} и средняя плотность плазмы после такого перехода примерно постоянны.

3. Н-РЕЖИМ С ELMs, Сопровождаемыми малыми пилообразными колебаниями, в токамаке глобус-м

Другой тип ELMs был обнаружен в разрядах без или с небольшими пилообразными колебаниями (см. рис. 2). Основные параметры такого разряда были следующими: $B_{tor} = 0.5$ Тл, $I_p = 240$ кА, $q_{95} = 5$, $\langle n_e \rangle = 3 \times 10^{19}$ м⁻³. Эти ELMs характеризуются большей частотой появления. В присутствии высокочастотных ELMs останавливается увеличение плотности плазмы. Исчезновение этих ELMs приводит к улучшению удержания частиц. Происходит падение сигнала D_{α} , синхронизованное с увеличением плотности плазмы.

Для того чтобы понять, почему переход в H-режим без ELMs не влияет на улучшение удержания частиц для первого типа разряда, в то время как



Рис. 2. То же, что на рис. 1, но в случае высокочастотных ELMs. Вертикальная линия обозначает момент времени 174 мс, когда ELMs пропадают.

переход в H-режим без ELMs приводит к его улучшению для второго типа разряда, нам необходимо изучить поведение потока плазмы и турбулентность при переходе к свободным от ELMs режимам.

4. ДОППЛЕРОВСКОЕ ОБРАТНОЕ РАССЕЯНИЕ

Основным инструментом изучения потока и турбулентности в токамаке Глобус-М является допплеровское микроволновое обратное рассеяние [17—19]. Допплеровское обратное рассеяние (ДОР) основано на обратном рассеянии микроволнового излучения при наклонном падении на поверхность плазмы при наличии слоя отсечки для зондирующего пучка. Обратное рассеяние в основном локализовано вблизи слоя отсечки.

Диагностика позволяет измерять скорость V_{\perp} в направлении диамагнитного или **E** × **B** дрейфа плазмы. Рассеяние происходит на флуктуациях с волновыми числами k_{\perp} в узкой полосе, определяемой условием Брэгга.

Кроме того, спектральная мощность $|n(k_{\perp}, \omega)|^2$ флуктуаций плотности плазмы для выбранной узкой полосы k_{\perp} может быть оценена путем измерения мощности обратного рассеяния. Недавно метод ДОР был применен в токамаке Глобус-М для исследования плазменных колебательных



Рис. 3. Полоидальное сечение токамака Глобус-М с изображением магнитных поверхностей и лучевых траекторий.

процессов (например, филаментов [20, 21], геодезических акустических мод [22, 23], колебаний предельного цикла [24] и альфвеновских неустойчивостей [25]).

Четырехчастотное зондирование позволяет нам изучать турбулентность на четырех радиусах одновременно (рис. 3). Для выбранных частот (20, 29, 39, 48 ГГц) доступная для исследований область находилась вблизи плазменного пьедестала внутри сепаратрисы, а типичные значения волновых векторов обратно рассеивающих флуктуаций плотности составляли 2, 4, 6, 8 см⁻¹.

5. ТУРБУЛЕНТНОСТЬ И ПОТОКИ ПРИ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ELMs

На рис. 4а показаны осциллограммы плотности плазмы, D_{α} и расчетной скорости флуктуаций плотности плазмы при трех радиусах. Скорости вращения до перехода в режим без ELMs, вычисленные в период между двумя низкочастотными ELMs, близки к нулю, а в режиме без ELMs скорость вращения в направлении диамагнитного



Рис. 4. а) — Временная эволюция электронной плотности n_e , интенсивности излучения на линии D_{α} и скорости вращения плазмы (V_{\perp}); б) — спектры сигналов ДОР между ELMs (красный) и после перехода в свободный от ELMs режим (зеленый). Низкочастотные ELMs. № 36652 R = 54 см.

дрейфа электронов увеличивается. Изменение скорости также можно увидеть в спектрах сигналов ДОР (рис. 4б). Положение максимума красного спектра, которое было рассчитано в период между двумя низкочастотными ELMs, близко к нулю, в то время как зеленый спектр, который соответствует свободному от ELMs режиму, сдвигается в область положительных частот. Интеграл этих спектров пропорционален амплитуде турбулентности. Абсолютные измерения амплитуды

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ том 46 № 7 2020



Рис. 5. Эволюция амплитуды сигнала ДОР для трех радиусов отсечки. Низкочастотные ELMs. Амплитуда турбулентности для каждого канала ДОР вычислена в различных условных единицах.

флуктуаций плотности не проводились, так как для этого требуются специальные калибровочные измерения всего тракта регистрации обратного рассеянного излучения.

Временное поведение амплитуды турбулентности для различных радиусов представлено на рис. 5. Уменьшение амплитуды турбулентности наблюдается только в случае самого глубокого радиуса (около 0.6 малого радиуса, $k_{\perp} = 8 \text{ см}^{-1}$). Амплитуда турбулентности при $\rho = 0.7$ и 0.8 ($k_{\perp} = 6 \text{ см}^{-1}$ и $k_{\perp} = 4 \text{ см}^{-1}$, соответственно) не уменьшается после перехода в режим без ELMs.

6. ТУРБУЛЕНТНОСТЬ И ПОТОКИ ПРИ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ELMs

В случае высокочастотных ELMs инверсия скорости отсутствует, как видно на рис. 6а. Более того, абсолютное значение скорости (5–10 км/с, рис. 6а) намного выше, чем в случае низкочастотных ELMs (см. рис. 4а). Спектр ДОР (рис. 6б), рассчитанный за время между двумя высокочастотными ELMs (красный), уширен по сравне-



Рис. 6. а) — Временная эволюция электронной плотности n_e , интенсивности излучения на линии D_{α} и скорости вращения плазмы (V_{\perp}); б) — спектры сигналов ДОР между ELMs (красный) и после перехода в свободный от ELMs режим (зеленый); в) — профили скорости вращения плазмы. Высокочастотные ELMs.

нию со спектром без ELMs (зеленый). Наблюдаемое уширение можно объяснить появлением большего шира скорости вращения плазмы. На рис. 6в показаны профили скорости вращения плазмы во всех обсуждаемых ранее режимах. Видно увеличение абсолютных значений скорости в случае разряда с высокочастотными ELMs.

Амплитуда турбулентности (рис. 7), рассчитанная для периферийной области ($\rho = 0.7-0.9$),



Рис. 7. Эволюция амплитуды сигнала ДОР для четырех радиусов отсечки. Высокочастотные ELMs. Амплитуда турбулентности для каждого канала ДОР вычислена в различных условных единицах.

уменьшилась после перехода в режим без ELMs. Это может привести к уменьшению периферийных коэффициентов переноса и улучшению качества периферийного транспортного барьера, что выражается в увеличении плотности и уменьшении излучения на линии D_{α} (см. рис. 2).

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

ELMs с низкой частотой появления в токамаке Глобус-М характеризуются переходом в режим, свободный от ELMs, при уменьшении плазменного тока и вероятного изменения в профиле плотности тока. Такой переход связан с уменьшением пилообразных колебаний *SXR*. Уровень турбулентности на периферии меняется мало. Можно предположить, что перенос меняется мало, о чем свидетельствует постоянство уровня D_{α} и средней плотности.

Режим с высокой частотой появления ELMs характеризуется спонтанным переходом в свободный от ELMs режим. Амплитуда турбулентности уменьшается во время такого перехода. Наблюдались две характерные особенности подавления периферийного переноса: увеличение электронной плотности и уменьшение свечения на линии D_{α} .

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 18-72-10028).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Wagner F., Becker G., Behringer K., Campbell D., Eberhagen A., Engelhardt W., Fussmann G., Gehre O., Gernhardt J., Gierke G.v., Haas G., Huang M., Karger F., Keilhacker M., Kluber Q., Kornherr M., Lackner K., Lisitano G., Lister G.G., Mayer H.M., Meisel D., Miller E.R., Murmann H., Niedermeyer H., Poschenrieder W., Rapp H., Bohr H., Schneider F., Siller G., Speth E., Stabler A., Steuer K.H., Venus G., Vollmer O., Yu Z. // Phys. Rev. Lett. 1982. V. 49. P. 1408. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.49.1408
- Burrell K.H., Osborne T.H., Snyder P.B., West W.P., Fenstermacher M.E., Groebner R.J., Gohil P., Leonard A.W., Solomon W.M. // Phys. Rev. Lett. 2009. V. 102. 155003.
 - https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.102.155003
- Hatae T., Kamada Y., Ishida S., Fukuda T., Takizuka T., Shirai H., Koide Y., Kikuchi M., Yoshida H., Naito O. // Plasma Phys. Control. Fusion. 1998. V. 40. P. 1073. https://doi.org/10.1088/0741-3335/40/6/013
- Breger P., Flewind C., Zastrow K.-D., Davies S.J., Hawkes N.C., König R.W.T., Pietrzyk Z.A., Porte L., Summers D.D.R., Hellermann M.G.v. // Plasma Phys. Control. Fusion. 1998. V. 40. P. 347. https://doi.org/10.1088/0741-3335/40/3/001
- Maingi R., Sabbagh S.A., Bush C.E., Fredrickson E.D., Menard J.E., Stutman D., Tritz K., Bell M.G., Bell R.E., Boedo J.A., Gates D.A., Johnson D.W., Kaita R., Kaye S.M., Kugel H.W., LeBlanc B.P., Mueller D., Raman R., Roquemore A.L., Soukhanovskii V.A., Stevenson T. // J. Nucl. Mater. 2005. V. 337–339. P. 727. https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2004.08.023
- Mansfield D.K., Kugel H.W., Maingi R., Bell M.G., Bell R., Kaita R., Kallman J., Kaye S., LeBlanc B., Mueller D., Paul S., Raman R., Roquemore L., Sabbagh S., Schneider H., Skinner C.H., Soukhanovskii V., Timberlake J., Wilgen J., Zakharov L. // J. Nucl. Mater. 2009. V. 390–391. P. 764.
 - https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2009.01.203
- Maingi R., Osborne T.H., LeBlanc B.P., Bell R.E., Manickam J., Snyder P.B., Menard J.E., Mansfield D.K., Kugel H.W., Kaita R., Gerhardt S.P., Sabbagh S.A., Kelly F.A. (the NSTX research team) // Phys. Rev. Lett. 2009. V. 103. 075001.
 - https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.103.075001
- Burrell K.H., Austin M.E., Brennan D.P., DeBoo J.C., Doyle E.J., Gohil P., Greenfield C.M., Groebner R.J., Lao L.L., Luce T.C., Makowski M.A., McKee G.R., Moyer R.A., Osborne T.H., Porkolab M., Rhodes T.L., Rost J.C., Schaffer M.J., Stallard B.W., Strait E.J.,

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ том 46 № 7 2020

Wade M.R., Wang G., Watkins J.G., West W.P., Zeng L. // Plasma Phys. Control. Fusion. 2002. V. 44. A253. https://doi.org/10.1088/0741-3335/44/5A/325

- Suttrop W., Maraschek M., Conway G.D., Fahrbach H.U., Haas G., Horton L.D., Kurki-Suonio T., Lasnier C.J., Leonard A.W., Maggi C.F., Meister H., Mück A., Neu R., Nunes I., Pütterich Th., Reich M., Sips A.C.C. // Plasma Phys. Control. Fusion. 2003. V. 45. P. 1399. https://doi.org/10.1088/0741-3335/45/8/302
- Gusev V.K., Bakharev N.N., Ber B.Ya., Bulanin V.V., Chernyshev F.V., Dyachenko V.V., Goncharov P.R., Gusakov E.Z., Iblyaminova A.D., Irzak M.A., Kaveeva E.G., Khitrov S.A., Khromov N.A., Kornev V.A., Kurskiev G.S., Melnik A.D., Minaev V.B., Mineev A.B., Mironov M.I., Novokhatsky A.N., Patrov M.I., Petrov A.V., Petrov Yu.V., Rozhansky V.A., Sakharov N.V., Saveliev A.N., Senichenkov I.Yu., Shchegolev P.B., Shcherbinin O.N., Tolstyakov S.Yu., Varfolomeev V.I., Voronin A.V., Yashin A.Yu. // Plasma Phys. Control. Fusion. 2016. V. 58. 014032.

https://doi.org/10.1088/0741-3335/58/1/014032

- Gusev V.K., Aminov R.M., Berezutskiy A.A., Bulanin V.V., Chernyshev F.V., Chugunov I.N., Dech A.V., Dyachenko V.V., Ivanov A.E., Khitrov S.A., Khromov N.A., Kurskiev G.S., Larionov M.M., Melnik A.D., Minaev V.B., Mineev A.B., Mironov M.I., Miroshnikov I.V., Mukhin E.E., Novokhatsky A.N., Panasenkov A.A., Patrov M.I., Petrov A.V., Petrov Yu.V., Podushnikova K.A., Rozhansky V.A., Rozhdestvensky V.V., Sakharov N.V., Shevelev A.E., Senichenkov I.Yu., Shcherbinin O.N., Stepanov A.Yu., Tolstyakov S.Yu., Varfolomeev V.I., Voronin A.V., Yagnov V.A., Yashin A.Yu., Zhilin E.G. // Nucl. Fusion. 2011. V. 51. 103019. https://doi.org/10.1088/0029-5515/51/10/103019
- 12. Gusev V.K., Aleksandrov S.E., Alimov V.Kh., Arkhipov I.I., Ayushin B.B., Barsukov A.G., Ber B.Ya., Chernyshev F.V., Chugunov I.N., Dech A.V., Golant V.E., Gorodetsky A.E., Dyachenko V.V., Kochergin M.M., Kurskiev G.S., Khitrov S.A., Khromov N.A., Lebedev V.M., Leonov V.M., Litunovsky N.V., Mazul I.V., Minaev V.B., Mineev A.B., Mironov M.I., Miroshnikov I.V., Mukhin E.E., Nikolaev Yu.A., Novokhatsky A.N., Panasenkov A.A., Patrov M.I., Petrov M.P., Petrov Yu V., Podushnikova K.A., Rozhansky V.A., Rozhdestvensky V.V., Sakharov N.V., Shcherbinin O.N., Senichenkov I.Yu., Shevelev A.E., Suhov E.V., Trapesnikova I.N., Terukov E.I., Tilinin G.N., Tolstyakov S.Yu., Varfolomeev V.I., Voronin A.V., Zakharov A.P., Zalavutdinov R.Kh., Yagnov V.A., Kuznetsov E.A., Zhilin E.G. // Nucl. Fusion. 2009. V. 49. 104021.

https://doi.org/10.1088/0029-5515/49/10/104021

- Kurskiev G.S., Gusev V.K., Sakharov N.V., Bakharev N.N., Iblyaminova A.D., Shchegolev P.B., Avdeeva G.F., Kiselev E.O., Minaev V.B., Mukhin E.E., Patrov M.I., Petrov Yu.V., Telnova A.Yu., Tolstyakov S.Yu. // Plasma Phys. Control. Fusion. 2017. V. 59. 045010. https://doi.org/10.1088/1361-6587/aa5cd5
- 14. Solokha V.V., Kurskiev G.S., Patrov M.I., Yashin A.Y. // AIP Conf. Proc. 2019. V. 2179. 020025. https://doi.org/10.1063/1.5135498
- Rhodes T.L., Ritz Ch.P., Lin H. // Phys. Rev. Lett. 1990.
 V. 65. P. 583. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.65.583

- 16. *Leonard A.W.* // Phys. Plasmas. 2014. V. 21. 090501. https://doi.org/10.1063/1.4894742
- Буланин В.В., Лебедев С.В., Левин Л.С., Ройтеритейн В.С. // Физика плазмы. 2000. Т. 26. С. 867. [Bulanin V.V., Lebedev S.V., Levin L.S., Roytershteyn V.S. // Plasma Phys. Rep. 2000. V. 26. P. 813.] https://doi.org/10.1134/1.1316822
- Hirsch M., Holzhauer E., Baldzuhn J., Kurzan B., Scott B. // Plasma Phys. Control. Fusion. 2001. V. 43. P. 1641. https://doi.org/10.1088/0741-3335/43/12/302
- Conway G.D., Schirmer J., Klenge S., Suttrop W., Holzhauer E. and the ASDEX Upgrade Team // Plasma Phys. Control. Fusion. 2004. V. 46. P. 951. https://doi.org/10.1088/0741-3335/46/6/003
- Буланин В.В., Варфоломеев В.И., Гусев В.К., Иванов А.Е., Крикунов С.В., Курскиев Г.С., Ларионов М.М., Минаев В.Б., Патров М.И., Петров А.В., Петров Ю.В., Сахаров Н.В., Толстяков С.Ю., Хромов Н.А., Яшин А.Ю. // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37. № 7. С. 103. [Bulanin V.V., Varfolomeev V.I., Gusev V.K., Ivanov A.E., Krikunov S.V., Kurskiev G.S., Larionov M.M., Minaev V.B., Patrov M.I., Petrov A.V., Petrov Yu.V., Sakharov N.V., Tolstyakov S.Yu., Khromov N.A., Yashin A.Yu. // Tech. Phys. Lett. 2011. V. 37. P. 340.] https://doi.org/10.1134/S1063785011040043
- Bulanin V.V., Gusev V.K., Khromov N.A., Kurskiev G.S., Minaev V.B., Patrov M.I., Petrov A.V., Petrov M.A., Petrov Yu.V., Prisiazhniuk D., Sakharov N.V., Tolstyakov S.Yu., Yashin A.Yu. // Nucl. Fusion. 2019. V. 59.

096026.

https://doi.org/10.1088/1741-4326/ab2cdf

 Буланин В.В., Вагнер Ф., Варфоломеев В.И., Гусев В.К., Курскиев Г.С., Минаев В.Б., Патров М.И., Петров А.В., Петров Ю.В., Присяжнюк Д.В., Сахаров Н.В., Толстяков С.Ю., Хромов Н.А., Щеголев П.Б., Яшин А.Ю. // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. № 9. С. 24. [Bulanin V.V., Wagner F., Varfolomeev V.I., Gusev V.K., Kurskiev G.S., Minaev V.B., Patrov M.I., Petrov A.V., Petrov Yu.V., Prisyazhnyuk D.V., Sakharov N.V., Tolstyakov S.Yu., Khromov N.A., Shchegolev P.B., Yashin A.Yu. // Tech. Phys. Lett. 2014. V. 40. P. 375]

https://doi.org/10.1134/S106378501405006X

- Yashin A.Y., Bulanin V.V., Petrov A.V., Petrov M.A., Gusev V.K., Khromov N.A., Kurskiev G.S., Patrov M.I., Petrov Y.V., Tolstyakov S.Y., Prisyazhnyuk D.V. // JINST. 2015. 10. 10023. https://doi.org/10.1088/1748-0221/10/10/P10023
- Yashin A. Yu., Bulanin V.V., Gusev V.K., Kurskiev G.S., Patrov M.I., Petrov A.V., Petrov Yu.V., Tolstyakov S.Yu. // Nucl. Fusion. 2018. V. 58. 112009. https://doi.org/10.1088/1741-4326/aac4d8
- Буланин В.В., Гусев В.К., Курскиев Г.С., Минаев В.Б., Патров М.И., Петров А.В., Петров М.А., Петров Ю.В., Тельнова А.Ю., Яшин А.Ю. // Письма в ЖТФ. 2017. Т. 43. № 23. С. 40. [Bulanin V.V., Gusev V.K., Kurskiev G.S., Minaev V.B., Patrov M.I., Petrov A.V., Petrov M.A., Petrov Yu.V., Telnova A.Yu., and Yashin A.Yu. // Tech. Phys. Lett. 2017. V. 43. P. 1067] https://doi.org/10.1134/S1063785017120033] https://doi.org/10.21883/PJTF.2017.23.45274.16986

Study of Turbulence in the Globus-M Tokamak Plasma during the Transition to the ELM-free H-mode

A. Y. Yashin^{1, #,##}, V. V. Bulanin¹, A. V. Petrov¹, V. K. Gusev², G. S. Kurskiev², V. B. Minaev², M. I. Patrov², and Y. V. Petrov²

¹ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg, Russia

² Ioffe Institute, Saint-Petersburg, Russia

#e-mail: alex_yashin@list.ru

##e-mail: A. Yashin@spbstu.ru

Abstract—Here we report the results of the turbulence study in the high confinement mode (H-mode) with and without edge localized modes (ELMs). The study was performed by the Doppler backscattering (DBS) method on the Globus-M tokamak. Two types of ELMs were observed in the Globus-M tokamak during NBI heating and accordingly, two different transitions to transient ELM-free modes were discovered. It was demonstrated that the transition from the H-mode with ELMs accompanied by small sawteeth to the ELM-free H-mode is characterized by the drop of the turbulence amplitude near the periphery while the transition in the case of ELMs is accompanied by large sawteeth occur without suppression of peripheral turbulence.

Keywords plasma, tokamak, H-mode, turbulence, edge localized mode, Doppler backscattering