

УДК 533.952

А.В.Павлов (6 курс, каф. ФП), С.В.Шаталин, к.ф.-м.н., доц.

СТАТИСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТУРБУЛЕНТНОСТИ В ПЕРИФЕРИЙНОЙ ПЛАЗМЕ НА ТОКАМАКЕ ФТ-2

Периферийная плазма в установках с магнитным удержанием характеризуется сложными физическими явлениями, которые тесно связаны с параметрами удержания в основном объеме. Область (scrape-off layer, SOL) за последней замкнутой магнитной поверхностью (LCFS) представляет значительные трудности для диагностики и интерпретации результатов эксперимента. Параметры в SOL, в отличие от основного объема удержания, оказываются в общем случае трехмерными. Измерения на различных обходах тора оказываются, как правило, невозможными на крупномасштабных установках. Однако плазма токамаков небольших размеров, являющаяся более гибким и сравнительно легко диагностируемым объектом, может служить полезным источником необходимых экспериментальных данных. Целью данной работы является статистический анализ флуктуаций периферийных параметров плазмы и радиального переноса частиц. Такие исследования важны для построения адекватных теоретических моделей аномального переноса. Действительно, в стохастических моделях плазменной турбулентности зачастую используют предположение о нормальном законе распределения параметров флуктуационных процессов [1]. В то же время, экспериментальные данные, полученные на различных установках, свидетельствуют о наличии во временных реализациях флуктуаций плотности и радиального потока частиц резких пиков и провалов [2-7]. Это может приводить к значительному отклонению PDF флуктуирующих параметров от нормального закона.

В работе представлены результаты статистических свойств флуктуаций ионного тока насыщения I_{sat} и радиального потока частиц Γ_r в периферийной области токамака ФТ-2 до и после перехода в режим улучшенного удержания (большой радиус $R=55$ см, радиус полоидальной диафрагмы $a=7.9$ см), полученные с помощью Ленгмюровского многоэлектродного зонда. Данные получены с помощью зондовых измерений. L-H переход был обнаружен в экспериментах по дополнительному нижнегибридному нагреву при эффективном поглощении энергии волны ($f=920$ МГц, $P < 120$ кВт) в резонансной приосевой области объема удержания [8]. Дополнительный нагрев (длительность импульса нижнегибридного (НГ) нагрева $\Delta t_{\text{LHH}}=5$ мс) включался на 30 мс разряда при следующих значениях основных параметров: тороидальное магнитное поле $B_{\text{tor}}=22$ кГс, ток по плазме $I_{\text{pl}}=22$ кА. В процессе нагрева наблюдалось увеличение концентрации n в центре шнура с $3 \cdot 10^{13}$ см⁻³ до $4 \cdot 10^{13}$ см⁻³ и ионной температуры T_i – со 100 эВ до 200 эВ.

Зондовые измерения проводились для двух полоидальных углов – 230° и 310° , что соответствует внутреннему (сторона сильного магнитного поля, HFS) и внешнему (сторона слабого магнитного поля, LFS) обходу по тору, и шагом 1 мм по малому радиусу с 78 мм до 74 мм, что позволило установить радиальную эволюцию статистических свойств исследуемых величин на сильной и слабой сторонах магнитного поля. При регистрации ионного тока насыщения и плавающего потенциала использовались 10-разрядные АЦП с тактовой частотой записи 1МГц. Анализ данных проводился по однамиллисекундным временным выборкам: для L-моды – с 29 мс по 30 мс, для H-моды – с 35 мс по 36 мс.

Экспериментальные данные показали, что интенсивность флуктуаций убывает как с увеличением радиуса r , так и после перехода в режим улучшенного удержания. Также можно было заметить, что соотношение всплесков и провалов в сигнале флуктуаций тока насыщения, а соответственно, и флуктуаций концентрации, меняется в обоих случаях.

Была произведена проверка на соответствие временной реализации флуктуаций тока насыщения нормальному распределению с применением критерия χ^2 [9]. В качестве тестовой функции для данного анализа было выбрано распределение Гаусса со статистическими средним и дисперсией, вычисленными по исследуемой выборке. Для Н-моды характерно существенное отличие распределения I_{sat} от нормального закона во всех пространственных точках, в которых проводились измерения. После перехода в режим улучшенного удержания был виден рост отклонения распределения тока насыщения от распределения Гаусса при удалении от границы шнура. Причем на внутреннем обходе тора вблизи основного объема удержания PDF флуктуаций тока насыщения подчиняется нормальному закону. Функция распределения флуктуационного радиального потока частиц негауссова во всех точках измерений как до, так и после перехода в режим улучшенного удержания.

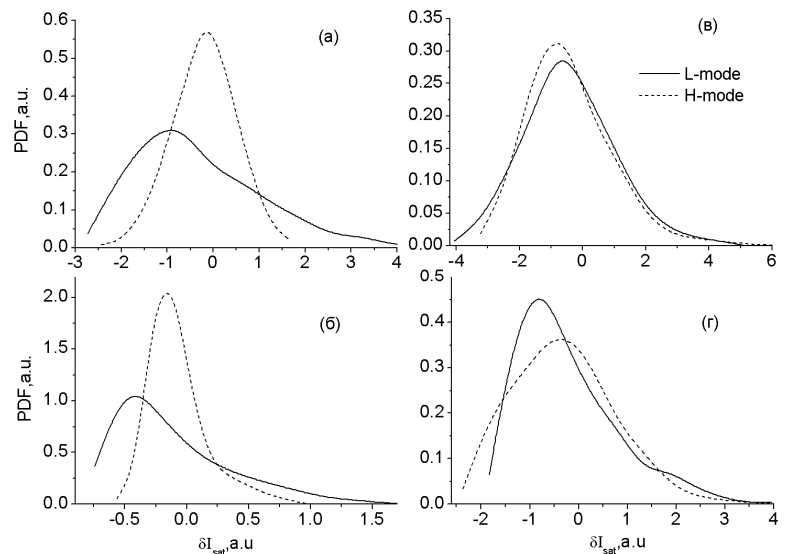


Рис. 1. Функции распределения амплитуд ионного тока насыщения до и после ЛН-перехода. (а), (б) – на внутреннем обходе тора в точках $r=74\text{мм}$ и $r=78\text{мм}$ соответственно; (в), (г) – на внешнем обходе тора в точках $r=74\text{мм}$ и $r=78\text{мм}$, соответственно

На рис. 1 представлены функции распределения вероятности флуктуаций тока насыщения (а, соответственно, и для плотности) в четырех пространственных точках до и после перехода в режим улучшенного удержания. Можно заметить, что в L-моде для функций распределений характерно наличие длинных хвостов в положительном направлении, которые соответствуют наличию большого количества вспышек.

Для всех пространственных точек измерений как для тока насыщения, так и для потока характерно, что PDF величин становятся уже и симметризируются после ЛН-перехода. Также заметно различие функций распределений на разных сторонах магнитного поля. Так, на внешнем обходе тора PDF более симметричны в L-моде и эволюция во время ЛН-перехода в этом случае меньше, чем на внешнем.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что предположение о нормальном законе распределений параметров плазмы, используемое в теоретических работах по плазменной турбулентности, применимо в некоторой области периферийной плазмы. Однако уточнение границ этой области требует дальнейших экспериментальных исследований. Такие данные будут важны для понимания механизмов возникновения и развития турбулентности в плазме установок с магнитным удержанием.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Krommes J.// Phys.Rept. 2002 V.360. P.1.
2. Antar G.Y. et al.// Phys.Plasmas. 2001. V.8. P.1612.
3. Xu Y.H. et al.// Plasma Phys. Control. Fusion. 2005. V.47. P.1841.
4. Devynck P. et al.// Plasma Phys. Control. Fusion. 2005. V.47. P.269.
5. Kirnev G.S. et al.// Nucl. Fusion. 2005. V.45. P.459.
6. Гончар В.Ю. и др.// Физика плазмы. 2003. Т.29. С.413.
7. Скворцова Н.Н. и др.// Физика плазмы. 2005. Т.31. С.64.
8. Lashkul S.I. et al.// Czechoslovak J. of Physics. 2002. V.52. P.1149.

9. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных. М.:Мир, 1989.