

УДК 522.8.623.2

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРИФЕРИЙНОЙ ПЛАЗМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ЗОНДАМИ ЛЕНГМЮРА В ТОКАМАКЕ T-10

*Р.Ю. Соломатин, С.А. Грашин**НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия*

Зонды Ленгмюра являются одной из наиболее используемых диагностик, позволяют проводить измерения средних значений и флуктуаций параметров периферийной плазмы: электронной температуры и концентрации, потоков частиц, потенциала, электрических полей, изучать турбулентный перенос частиц. В работе исследовано поведение данных параметров в пристеночной области плазмы токамака T-10. Вблизи последней замкнутой поверхности (LCFS) наблюдается формирование перемежаемой турбулентности, относительный уровень флуктуаций возрастает с увеличением радиуса. Радиальное электрическое поле  $E_r$  имеет положительный знак в области плазмы, находящейся за диафрагмой (SOL), вблизи LCFS меняет знак. Скорость полоидального вращения плазмы и скорость  $E \times B$ -дрейфа в SOL составляют 0,5—1,5 км/с и направлены в сторону ионного диамагнитного дрейфа. В периферийной плазме наблюдаются колебания ГАМ-типа (12—18 кГц). Частота колебаний растёт с увеличением электронной температуры  $T_e$ , что совпадает с предсказаниями теории ГАМ-осцилляций.

**Ключевые слова:** токамак T-10, зонды Ленгмюра, турбулентность.

## INVESTIGATIONS OF THE PERIPHERAL PLASMA BY LANGMUIR PROBES ON THE T-10 TOKAMAK

*R.Yu. Solomatin, S.A. Grashin**NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia*

Langmuir probes are one of the most used diagnostics that allow us to take measurements of mean and fluctuated parameters of the peripheral plasma such as the electron temperature and concentration, particle flux, plasma potential, electric fields, to study the turbulent particle transport. The work represents investigations of these parameters' behavior in the peripheral plasma of T-10 tokamak. Near the LCFS is observed the formation of intermittent turbulence, the relative level of fluctuations rises with the radius. Radial electric field  $E_r$  is positive in the SOL and changes its sign near the LCFS. The poloidal plasma rotation velocity and the  $E \times B$  drift velocity in the SOL are close to each other in value 0.5—1.5 km/s and directed towards the ion diamagnetic drift. In the peripheral plasma the Geodesic-Acoustic-Mode-like (GAM) oscillations were observed (12—18 kHz). The frequency of oscillations rises with the electron temperature  $T_e$ , according to the theoretical predictions for GAM-oscillations.

**Key words:** T-10 tokamak, Langmuir probes, turbulence.

DOI: 10.21517/0202-3822-2017-40-2-55-60

### ВВЕДЕНИЕ

В экспериментах на существующих термоядерных установках (токамаках, стеллараторах и др.) периферийная плазма играет важнейшую роль и во многом определяет процессы в центральной плазме. Особый интерес при этом вызывает исследование взаимодействия плазмы с элементами первой стенки в термоядерных установках, вызывающего загрязнение плазмы поступающими со стенки примесями, что, в свою очередь, влияет на удержание частиц и энергии в основной плазме.

Зонды Ленгмюра являются одной из наиболее используемых диагностик периферийной плазмы в токамаках, так как это простой и недорогой способ измерения как средних значений, так и флуктуаций параметров периферийной плазмы: электронная температура и концентрация, потоки частиц, потенциал, электрическое поле и число Маха. Более того, именно эта диагностика позволяет детально изучать и измерять локальные потоки частиц и турбулентный перенос частиц и энергии в периферийной плазме [1, 2].

Измерения в SOL, проведённые ранее с помощью электрических зондов Ленгмюра вблизи LCFS (для T-10  $r = 0,3$  м), показывают [3, 4], что аномальный конвективный недиффузионный транспорт играет определяющую роль в переносе частиц поперёк магнитного поля. Это приводит к увеличению ширины SOL. Аномальный недиффузионный перенос вызван сильной плазменной турбулентностью, имеющей «перемежаемый» характер, и связан с формированием в периферийной плазме структур с повышенной плотностью («блотов») и их радиальным распространением [5, 6].

Чтобы сделать выводы о роли различных механизмов переноса в токамаке, нужно изучить характеристики флуктуаций плотности и потенциала периферийной плазмы, зависимости характеристик от других параметров плазмы. Характеристики турбулентности, в свою очередь, связаны с электрическими полями, возникающими в периферийной плазме токамака. Изучение характеристик турбулентности и

электрических полей вблизи LCFS и их корреляции с турбулентностью в основной плазме позволяет делать выводы о механизмах переноса частиц, а также проводить анализ баланса частиц и времени их удержания. Изучение спектральных характеристик флуктуаций плотности и потенциала в периферийной плазме позволяет судить о роли различных типов неустойчивостей (МГД-неустойчивостей, ГАМ) в процессах переноса частиц и энергии.

### ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

На токамаке Т-10 характеристики периферийной турбулентности и турбулентные потоки частиц исследовались с помощью подвижных зондов Ленгмюра и зондирования пучком тяжёлых ионов (НИВР) [7]. Токамак Т-10 имеет большой радиус  $R_0 = 1,5$  м, рельсовый лимитер на радиусе 0,30 м и круговой лимитер радиусом 0,33 м. Эксперименты проводились в омическом дейтериевом разряде. Средняя плотность электронов  $n_e$  менялась в диапазоне  $1 \cdot 10^{19} - 4 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ , тороидальное магнитное поле составляло  $B_t = 2,3$  Тл, ток плазмы  $I_p = 0,2 - 0,3$  МА.

Измерение параметров плазмы в SOL проводилось с использованием двух систем (рис. 1, з). Подвижная зондовая система (рис. 1, а, б) включала 10 вольфрамовых зондов, распределённых в полоидальном и радиальном направлениях. Расстояние между соседними зондами составляло 0,26 см. Система размещалась с внешней стороны тора и могла изменять радиальные профили параметров плазмы, меняя радиальное положение в промежутке между импульсами. Вторая система включала графитовые зонды, размещённые вблизи вершины рельсового лимитера (рис. 1, в). Система регистрации имела временное разрешение 1 мкс.

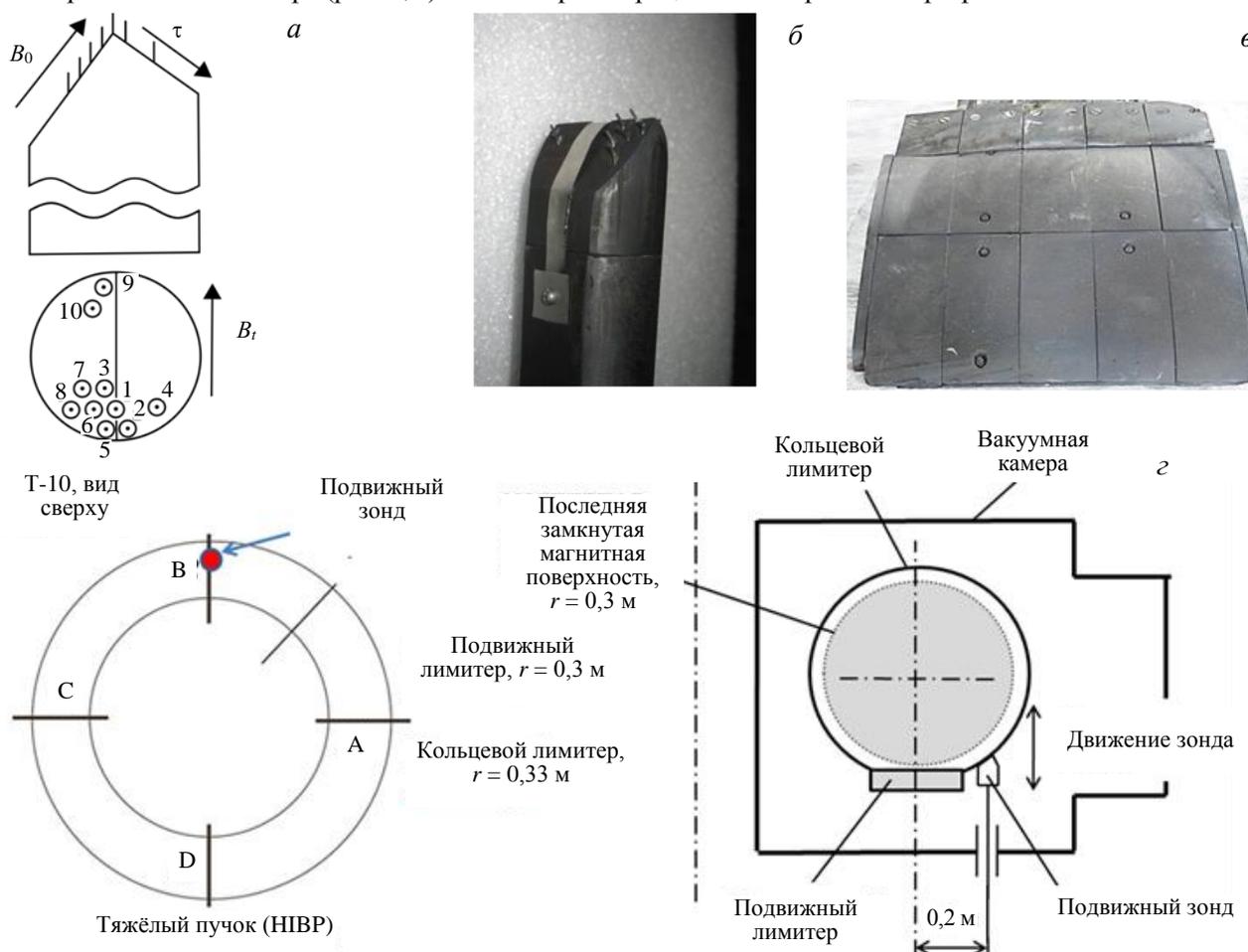


Рис. 1. Зонды Ленгмюра на токамаке Т-10: а — схема расположения и нумерация зондов на графитовой головке; б — вид графитовой головки с вольфрамовыми зондами на подвижном вводе; в — подвижный лимитер с размещёнными в нём графитовыми зондами; з — схема размещения зондов на Т-10

В экспериментах измерялись величины и флуктуации ионного тока насыщения  $I_s$ , плавающего потенциала  $U_\phi$ , электронной температуры  $T_e$ , радиального и полоидального электрических полей и радиального турбулентного потока частиц. Электрические поля  $E_r$  и  $E_t$  измерялись как разность потенциалов

между двумя близко расположенными полоидально или радиально разнесёнными зондами. Для расчётов использовались формулы

$$\mathbf{E}_p = \frac{\Phi_2 - \Phi_1}{\Delta r}; V_i = \sqrt{\frac{2kT_e}{m_i}}; \tilde{n}_e = \frac{I_s}{0,4eS_z} V_i^{-1}; \tilde{V}_r = \frac{\mathbf{E}_p \times \mathbf{B}}{B^2}; \text{Flux}_\perp = \tilde{n}_e \tilde{V}_r.$$

### РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Флуктуации параметров плазмы (плотности, электрических полей, турбулентного потока), измеренные в SOL T-10, имели ярко выраженный перемежаемый характер (рис. 2) [8, 9].

Когерентные плазменные структуры формируются вблизи LCSF и распространяются в радиальном направлении к стенке камеры [4]. Радиальная скорость вблизи LCFS составляет 1 км/с и направлена преимущественно к стенке вакуумной камеры. Радиальный и полоидальный размер таких структур составляет 1—3 см.

Относительный уровень перемежаемой турбулентности (перемежаемая турбулентность — турбулентность, существующая в виде отдельных однополярных «вспышек») возрастает с увеличением радиуса в SOL (рис. 3). Период и длительность «блобов» увеличиваются (с 50 до 400 мкс). С приближением к стенке ( $r \geq 36$  см) турбулентность теряет перемежаемый характер, уровень флуктуаций перестаёт расти, затем падает [4].

На границе плазменного шнура ( $r = 0,30$  м), где уровень перемежаемой турбулентности мал, её статистические свойства близки к гауссовым. С возрастанием уровня турбулентности её статистические характеристики сильно отклоняются от гауссовых (рис. 4). Сравнение с НВР показывает, что в периферийной плазме существует зона ( $r = 25—30$  см), в которой статистика флуктуаций близка к гауссовой.

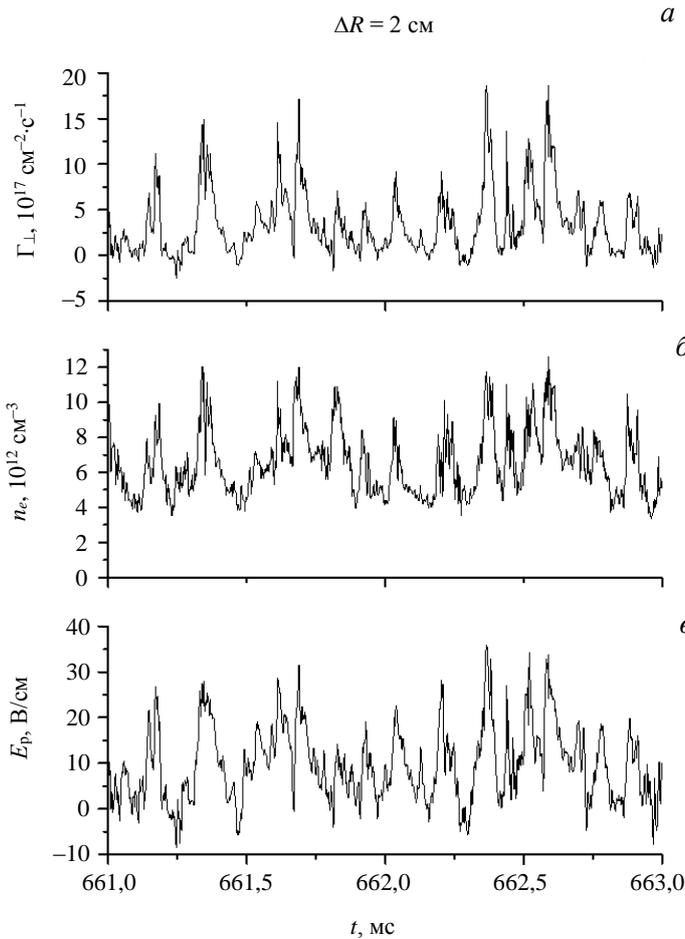


Рис. 2. Перемежаемая турбулентность параметров плазмы в SOL T-10: *a* — радиальный турбулентный поток  $\Gamma_\perp$ ; *б* — электронная плотность  $n_e$ ; *в* — полоидальное электрическое поле  $E_p$ ;  $B_t = 2,3$  Тл,  $I_p = 220$  кА,  $n_e = 2 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$

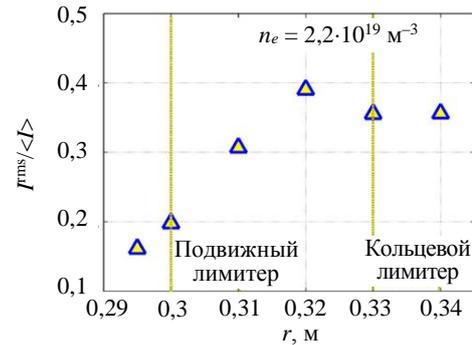


Рис. 3. Радиальный профиль относительного уровня флуктуаций тока насыщения ленгмюровского зонда

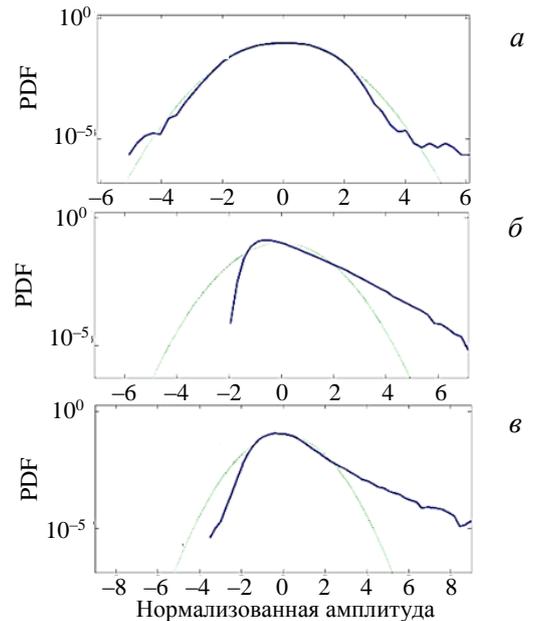


Рис. 4. Функция распределения (Probability Density Function (PDF)) флуктуаций тока насыщения сигналов зондов Ленгмюра:  $r = 0,30$  м (*a*);  $r = 0,32$  м (*б*);  $r = 0,34$  м (*в*)

Турбулентный перенос приводит к существенному уширению радиальных распределений параметров плазмы в SOL (рис. 5). Величина радиального турбулентного потока частиц вблизи LCFS достигает величины  $3 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  и составляет значительную часть полного радиального потока частиц через границу плазменного шнура. В полоидальном направлении турбулентность и турбулентные потоки сильно неоднородны [9].

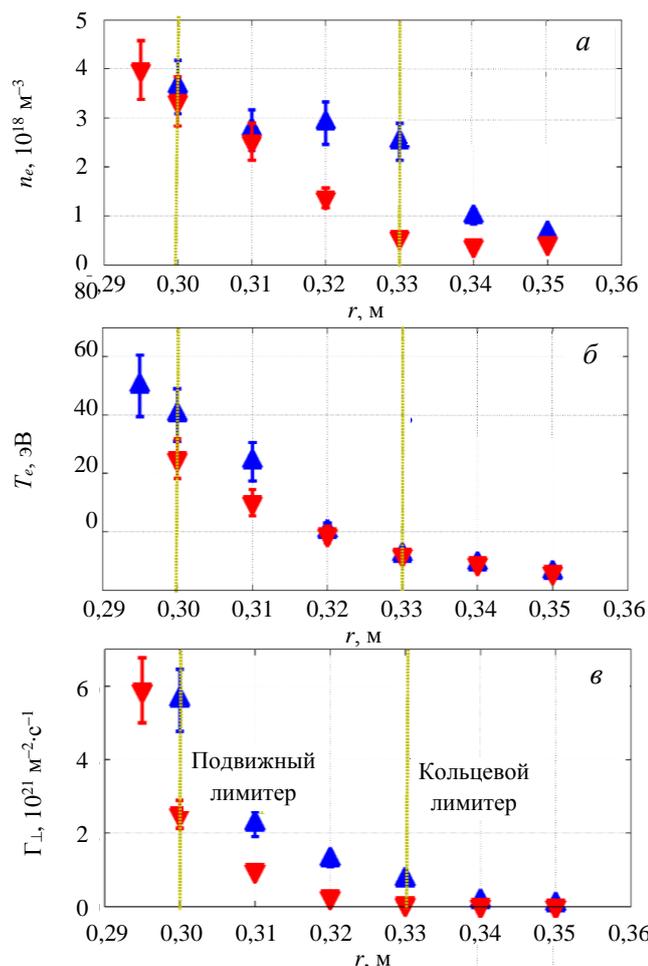


Рис. 5. Радиальное распределение параметров плазмы в SOL T-10: а — электронная плотность; б — электронная температура; в — радиальный турбулентный поток ( $B_t = 2,3 \text{ Тл}$ ,  $I_p = 220 \text{ кА}$ ,  $t = 650 \text{ мс}$ ):  $\blacktriangle$  —  $N_e = 3,2 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ ;  $\blacktriangledown$  —  $N_e = 2,2 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$

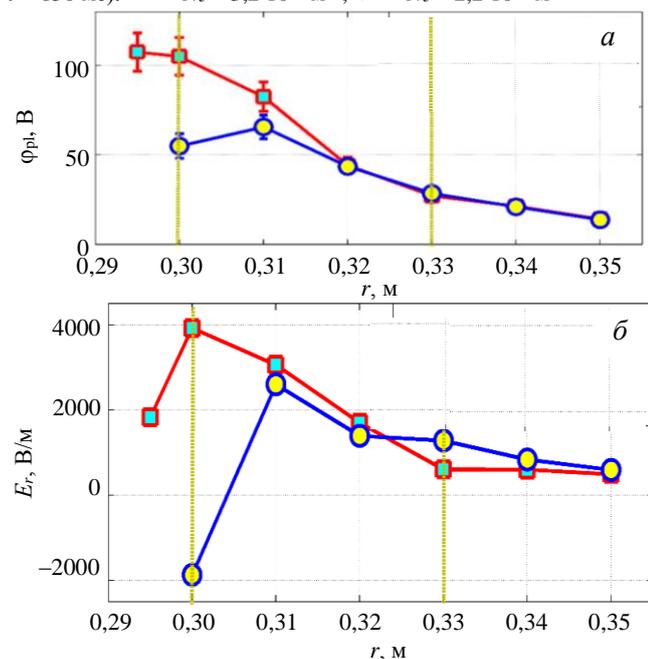


Рис. 6. Измеренные экспериментально профили потенциала плазмы (а) и радиального электрического поля (б) ( $B_t = 2,3 \text{ Тл}$ ,  $I_p = 220 \text{ кА}$ ,  $t = 650 \text{ мс}$ ):  $\blacksquare$  —  $N_e = 2,2 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ ;  $\bullet$  —  $N_e = 3,2 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$

На рис. 6 показаны экспериментально измеренные профили потенциала плазмы и радиального электрического поля. Потенциал плазмы вычислялся как  $\phi_{pl} = \phi_{pl} + kT_e$ , где  $\phi_{pl}$  — потенциал плазмы,  $\phi_{pl}$  — плавающий потенциал, измеренный зондами,  $k = 1,8—2,6$ . Некоторое несоответствие  $E_r$  величине производной от потенциала можно объяснить плохой воспроизводимостью разряда в T-10.

Радиальное электрическое поле  $E_r$  достигает величины  $4 \text{ кВ/м}$ , имеет положительный знак в SOL и меняет знак вблизи LCFS (см. рис. 6). Также вблизи LCFS меняются направления дрейфа  $E \times B$  и полоидального вращения плазмы (рис. 7), что может говорить о резком изменении характера и величины поперечного переноса частиц.

Измерение временной задержки сигналов  $I_s$  двух полоидально разнесённых зондов позволило оценить скорость полоидального вращения плазменных структур. Измеренная скорость полоидального вращения плазмы (рис. 8) и скорость дрейфа  $E \times B$  в SOL близки по величине ( $-1,0—-1,5 \text{ км/с}$ ) и совпадают по направлению. Она может быть направлена как в сторону ионного, так и в сторону электронного диамагнитного дрейфа.

Измерение временной задержки сигналов  $I_s$  двух полоидально разнесённых зондов позволило оценить скорость полоидального вращения плазменных структур. Измеренная скорость полоидального вращения плазмы (рис. 8) и скорость дрейфа  $E \times B$  в SOL близки по величине ( $-1,0—-1,5 \text{ км/с}$ ) и совпадают по направлению. Она может быть направлена как в сторону ионного, так и в сторону электронного диамагнитного дрейфа.

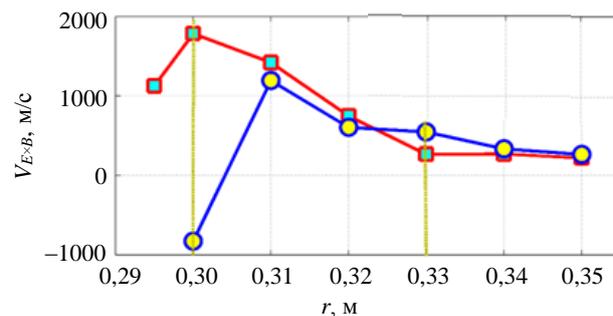


Рис. 7. Профиль скорости дрейфа  $E \times B$  ( $B_t = 2,3 \text{ Тл}$ ,  $I_p = 220 \text{ кА}$ ,  $t = 650 \text{ мс}$ ):  $\blacksquare$  —  $N_e = 2,2 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ ;  $\bullet$  —  $N_e = 3,2 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$

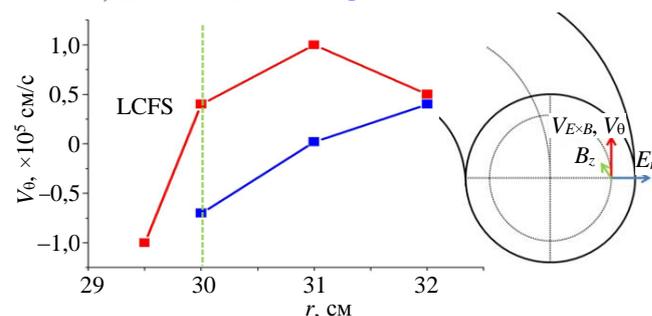


Рис. 8. Профиль скорости вращения полоидальных структур:  $\blacksquare$  —  $V_{pol}$ ,  $N_e = 2,2 \cdot 10^{13} \text{ м}^{-3}$ , № 66 133—66 137;  $\blacksquare$  —  $V_{pol}$ ,  $N_e = 3,2 \cdot 10^{13} \text{ м}^{-3}$ , № 66 485—66 489

Спектральные характеристики сигналов плотности и потенциала вблизи LCFS указывают на существование в периферийной плазме колебаний ГАМ-типа (12—18 кГц). ГАМ-колебания имеют «перемежаемый» характер. Ближе к стенке в SOL преобладают низкочастотные (1—9 кГц) колебания (рис. 9), ГАМ-колебания отсутствуют. Внутри LCFS наблюдается также квазиогерентный пик колебаний в диапазоне 50—100 кГц (рис. 10).

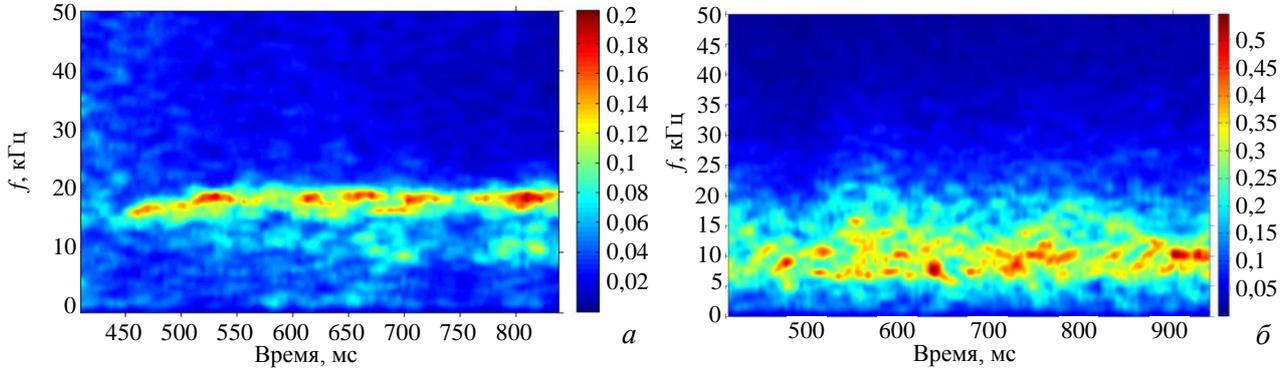


Рис. 9. Спектральные характеристики флуктуаций плавающего потенциала в SOLT-10 ( $B_t = 2,3$  Тл,  $I_p = 220$  кА,  $n_e = 2 \cdot 10^{19}$  м $^{-3}$ ): а —  $r = 0,30$  м; б —  $r = 0,32$  м

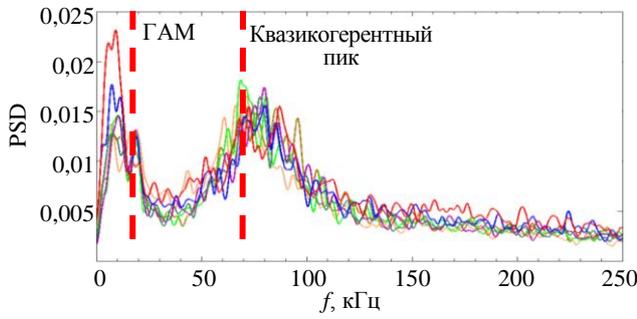


Рис. 10. Спектральные характеристики (Power Spectral Density (PSD)) флуктуаций плавающего потенциала в различные моменты времени одного импульса, № 64 481,  $r = 0,30$  м: — 515; — 597; — 670; — 703; — 756; — 810; — 830 мс

Частота ГАМ-колебаний растёт с увеличением электронной температуры  $T_e$  (рис. 11), что совпадает с предсказаниями теории ГАМ-осцилляций [10].

Частота ГАМ-колебаний согласуется с измерениями, проводимыми с помощью НВР на периферии плазменного шнура и в его центре [11]. В ряде случаев колебания ГАМ-типа, измеренные ленгмюровскими зондами на периферии плазменного шнура и с помощью пучка

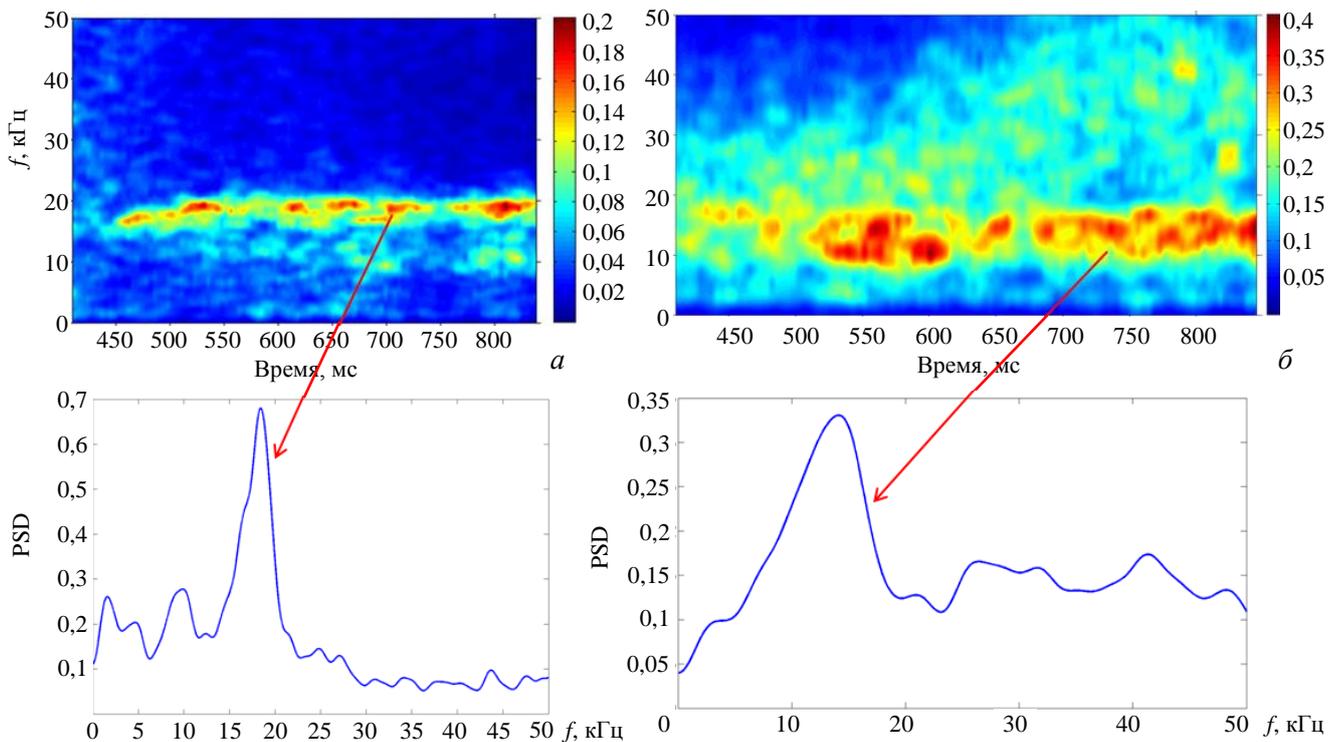


Рис. 11. Спектральные характеристики флуктуаций плавающего потенциала в SOLT-10 ( $B_t = 2,3$  Тл,  $I_p = 220$  кА,  $r = 0,30$  м): а — № 64 481,  $N_e = 2 \cdot 10^{19}$  м $^{-3}$ ,  $t = 700$  мс,  $T_e = 60$  эВ,  $f_{\text{ГАМ}} = 18$  кГц; б — № 66 489,  $N_e = 3,2 \cdot 10^{19}$  м $^{-3}$ ,  $t = 740$  мс,  $T_e = 45$  эВ,  $f_{\text{ГАМ}} = 13\text{—}14$  кГц

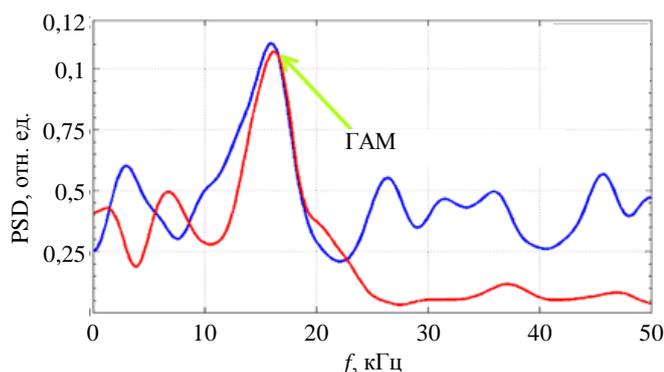


Рис. 12. Спектральная плотность мощности сигналов потенциала плазмы (№ 66 489,  $t = 771$  мс), измеренная LP (—,  $r = 0,30$  м) и HIBP (—,  $r = 0,25\text{—}0,26$  м)

близки к гауссовым. С возрастанием уровня турбулентности её статистические характеристики сильно отклоняются от гауссовых.

Радиальное электрическое поле имеет положительный знак в SOL. Вблизи LCFS  $E_r$  меняет знак. Скорость полоидального вращения плазмы и скорость дрейфа  $E \times B$  в SOL близки по величине (0,5—1,5 км/с) и направлены в сторону ионного диамагнитного дрейфа.

Спектральные характеристики сигналов плотности и потенциала вблизи LCFS указывают на существование в периферийной плазме колебаний ГАМ-типа (12—18 кГц) и квазикогерентных колебаний частотой 50—100 кГц.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда (проект № 14-22-00193) и при поддержке ГК «Росатом» (контракт № Н.4х.241.9Б.17.1011).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Donne A.J.H.** — Transactions of Fusion Science and Technology, 2006, vol. 49, p. 367—375.
2. **Boedo J. et al.** — Rev. Scient. Instr., 1998, vol. 69, p. 2663—2670.
3. **Zweben S.J. et al.** — Plasma Phys. Control. Fusion, 2007, vol. 49, p. S1—23.
4. **Kirnev G.S. et al.** — J. of Nuclear Materials, 2005, vol. 337—339, p. 352—356.
5. **Budaev V.P.** — Physics-Uspexhi, 2011, vol. 54, p. 875—918.
6. **Antar G.Y. et al.** — Phys. Plasmas, 2003, vol. 10, p. 419.
7. **Melnikov A.V. et al.** — Nucl. Fusion, 2013, vol. 53, p. 093019.
8. **Solomatin R.Y. et al.** — In: 41st EPS Conf. on Plasma Phys. and Nucl. Fusion. Berlin, 2014, P4.038.
9. **Kirnev G.S. et al.** — Nuclear Fusion, 2005, vol. 45, p. 459—467.
10. **Diamond P.M. et al.** — Plasma Phys. Control. Fusion, 2005, vol. 47, p. R35—R161.
11. **Melnikov A.V. et al.** — Nucl. Fusion, 2015, vol. 55, p. 063001.



Роман Юрьевич Соломатин,  
м.н.с.; НИЦ «Курчатовский  
институт», 123182 Москва,  
пл. Академика Курчатова 1,  
Россия  
r.solomatin@list.ru



Сергей Анатольевич Грашин,  
с.н.с., ветеран атомной  
энергетики и промышлен-  
ности; НИЦ «Курчатовский  
институт», 123182 Москва,  
пл. Академика Курчатова 1,  
Россия  
SAGrashin@nrcki.ru

тяжёлых ионов в его центре, показывают высокий уровень корреляции (рис. 12).

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вблизи LCFS наблюдается формирование перемежаемой турбулентности — «блобов». Относительный уровень турбулентности и размер плазменных структур возрастают с увеличением радиуса. Эта турбулентность определяет радиальный перенос частиц в SOL. На границе плазменного шнура, где перемежаемая турбулентность слабо выражена, её статистические свойства

Статья поступила в редакцию 7 февраля 2017 г.

Вопросы атомной науки и техники.

Сер. Термоядерный синтез, 2017, т. 40, вып. 2, с. 55—60.