

## О ПРИРОДЕ ЛОКАЛЬНЫХ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ОБРАЗОВАНИЙ СИЛЬНОТОЧНЫХ ПИНЧУЮЩИХСЯ РАЗРЯДОВ

*Ю.А.Быковский, В.Б.Лагода, А.Н.Облизин*

Показано, что учет тонкой структуры токонесущей плазмы позволяет объяснить основные особенности явлений, наблюдающихся при пинчевании сильноточных разрядов.

Как известно, токонесущая плазма сильноточных пинчующихся разрядов обладает тонкой структурой в виде совокупности токовых нитей. Это явление зарегистрировано в  $\Theta$ -пинчах и  $Z$ -пинчах<sup>1</sup>, плазменном фокусе (ПФ) геометрии Мейзера<sup>2</sup> и геометрии Филиппова<sup>3</sup>, вакуумном разряде с лазерным инициированием<sup>4</sup> и др. В наиболее полной обобщенной форме структура токовых нитей, формирующих коллапсирующую токовую оболочку, экспериментально и теоретически изучена в<sup>5-7</sup>. В частности, установлено: а) наличие эффекта самостабилизации токовых нитей за счет развития внутренних продольных магнитных полей  $B_z$ ;

б) свойство нитей возникать парами, с противоположенными  $B_Z$ ; в) близость поперечного размера отдельной нити к ларморовскому диаметру иона в поле  $B_Z$  ( $2\rho_Z$ ).

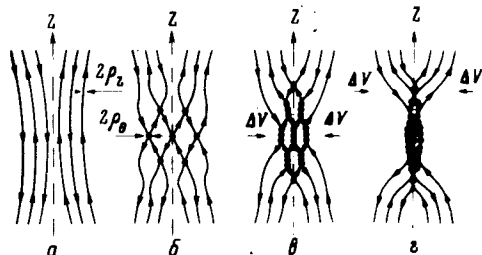
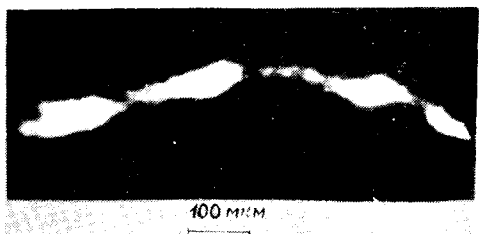


Рис.1. Локальные высокотемпературные плазменные образования, возникшие вдоль линии смыкания нескольких токовых нитей. Фотография сделана в рентгеновских лучах с энергией квантов  $\geq 2$  кэВ

Рис.2. Схема смыкания самостабилизированных токовых нитей. Стрелками показано направление полей  $B_Z$

В работах<sup>4,8-10</sup>, в последующих исследованиях авторов настоящего сообщения, было установлено, что при смыкании нескольких токовых нитей удовлетворяющих условию

$$\sum_i B_Z^i = 0, \quad (1)$$

где  $i$  — порядковый номер нити участвующей в процессе смыкания, происходит образование локальных высокотемпературных плазменных образований (ЛВПО, рис.1), обладающих следующими свойствами: а) электронная температура  $\sim$ несколько кэВ, электронная плотность ( $n_e$ )  $\sim 10^{21}$  см<sup>-3</sup>; б) поперечный размер горячей области ЛВПО близок к ларморовскому диаметру иона в азимутальном магнитном поле тока  $B_\theta$  ( $2\rho_\theta$ ); в) после возникновения горячего ядра ЛВПО осуществляется его сравнительно медленное расширение, время распада ЛВПО сравнимо с общей длительностью процесса пинчевания; г) энерговклад в области ЛВПО обусловлен черенковской раскачкой плазменной турбулентности и сопровождается излучением в микроволновой области; д) ЛВПО является источником высокоэнергетических ионов, эммитируемых вдоль оси в обоих направлениях (наиболее вероятным механизмом ускорения является ускорение на продольных плазменных волнах — ионном звуке).

Целью настоящего сообщения является показать возможность описания явлений, наблюдаемых при пинчевании сильноточных разрядов, совокупностью процессов, каждый из которых развивается в области смыкания нескольких токовых нитей удовлетворяющих условию (1).

В качестве примера рассмотрим схему сближения самостабилизированных токовых нитей при коллапсе (рис.2, а). Будем полагать плазму дейтериевой, времена анализируемых процессов много меньше периода разряда. Предположим существование критического тока способного протекать по отдельной нити ( $I_f^0$ ). Тогда количество нитей  $N_f = I / I_f^0$ , где  $I$  — полный ток разряда. По мере сближения каждая из нитей будет испытывать усиливающееся воздействие со стороны соседних нитей. При сближении до некоторого критического расстояния в центральной области произойдет потеря устойчивости нитей по отношению к развитию неустойчивости типа "змейка" (рис.2, б). В отдельных точках нити сомкнутся, произойдет аннигиляция полей  $B_Z$  и возникновение ЛВПО. Каждое из ЛВПО испустит пучок ускоренных ионов, импульс микроволнового излучения и диссипирует часть энергии разряда  $W_{LHPF}$ . Возникшие перезамкнувшиеся конфигурации полей  $B_Z$ , стремясь сомкнуться, дадут приращение  $\Delta V$  к скорости радиального сближения нитей в центральной части. Приращение  $\Delta V$  будет достигаться за счет высвобождения энергии аннигилирующих полей  $B_Z$ . Аномально быстрое сжатие возникшей связанной структуры будет

сопровождаться формированием новых ЛВПО вдоль линии смыкания нитей (рис.2, в). Такой процесс, сопровождающийся диссипацией энергии, будет распространяться в обоих направлениях вдоль оси  $Z$  (рис.2, г) до тех пор, пока ток в каждой из нитей не уменьшится до критического значения  $I_f^{cr} = KI_f^0$ , где  $K$  – постоянная, ниже которого образование ЛВПО прекратится. Общее количество возникших ЛВПО

$$N_{LHPF} = \frac{CI^2 - C(N_f I_f^{cr})^2}{W_{LHPF}} = I^2 \frac{C(1 - K^2)}{W_{LHPF}} \sim I^2,$$

где  $C$  – постоянная цепи разряда. Полагая, что механизм образования нейтронов в такой системе обусловлен взаимодействием ускоренных из области ЛВПО дейтонов с тепловыми дейтонами других ЛВПО, для нейтронного выхода получим  $N_n \sim 1/2 N_{LHPF}^2 \sim I^4$ .

В реальных сильноточных системах смыкание нитевидной структуры токнесущей плазмы при коллапсе представляет собой стохастический нерегулярный процесс. Тем не менее, наблюдается хорошее соответствие экспериментальных результатов с вышеприведенными схематичными рассуждениями. Так, предложенная модель практически полностью описывает основные особенности плазмы ПФ, именно: а) независимость  $n_e$  от  $I$  в широком диапазоне разрядных токов  $10 \text{ кДж} \leq CI^2 \leq 600 \text{ кДж}$  (согласно модели  $n_e$  должна быть близка к электронной плотности "среднего" ЛВПО, умноженной на коэффициент плотности упаковки); б) аномально высокую скорость радиального движения плазмы в области смыкания токового слоя; в) зависимость  $\sim I^4$  для нейтронного выхода; г) совпадение начала нейтронного выхода с моментом возникновения микроволнового излучения из области пинчевания; д) тот факт, что ионный поток из области пинчевания состоит из дискретного набора узконаправленных ионных пучков, независимость энергетического спектра ионного потока от  $I$  (каждый из ионных пучков ускоряется в одном из ЛВПО); е) отсутствие полного прерывания тока при пинчевании ( $K \neq 0$ ).

В соответствии с вышесказанным, процесс пинчевания может быть представлен как переход токнесущей плазмы из состояния с характерным линейным размером  $2\rho_Z$  в состояние с характерным линейным размером  $2\rho_\Theta$ . Подбор параметров сильноточных разрядов может быть интерпретирован как поиск оптимума для процесса смыкания нитевидной токовой структуры.

#### Литература

1. *Kvartskava I.F., et al.* Proc. 1-st IAEA Conf. Plasma Phys. Conf. Nucl. Fusion Res., Salzburg, 1961, 533.
2. *Bernard A. et al.* Phys. Fluids, 1975, 18, 180.
3. *Грибков В.А. и др.* ЖЭТФ, 1973, 18, 11.
4. *Bykovsky U.A., Lagoda V.B.* Proc. X-th Europ. Conf. Plasma Phys., Moscow, 1981, 1, D9.
5. *Nardi V.* Phys. Rev. Lett., 1970, 25, 718.
6. *Bostick W.H., Nardi V., Prior W. J.* Plasma Phys., 1972, 8, 7.
7. *Bostick W.H., Nardi V., Prior W.* Annals NY Academy Sciences, 1975, 251, 2.
8. *Быковский Ю.А., Лагода В.Б., Шерозия Г.А.* Письма в ЖЭТФ, 1979, 8, 489.
9. *Быковский Ю.А., Лагода В.Б., Шерозия Г.А.* Письма в ЖЭТФ, 1980, 5, 265.
10. *Bykovsky U.A., Lagoda V.B.* Proc. XV-th Int. Conf. Phen. Ionized Gases, Minsk, 1981, 2, 583.