

ДИНАМИЧЕСКАЯ СТАБИЛИЗАЦИЯ ТОРОИДАЛЬНОГО ПЛАЗМЕННОГО ШНУРА С ТОКОМ

*Р. А. Демирханов, А. Г. Киров, В. Н. Жариков, Н. И. Малых,
Л. Ф. Ручко, В. А. Жданов*

Показано, что макроскопическая устойчивость токонесущего плазменного шнура в трехзаходном стеллараторе имеет пороговую зависимость от отношения давления ВЧ поля к давлению полоидального поля $\eta = \tilde{p}/\bar{p}$, и что при достижении $\eta \approx 0,4$ шнур устойчив при $q_{эфф} \approx 1$. В стабилизированном режиме $\tilde{\beta}_\phi \approx \bar{\beta}_\phi \gg 1$.

В тороидальных магнитных ловушках с током типа токамак и стелларатор устойчивость плазменного шнура ухудшается при достижении $q = B_z \sigma / B_\phi R$ величины порядка 2 + 3. Как указывает [1], $q \approx 2$ является, вероятно, предельно достижимой величиной для токамака. В то же время уменьшение q , т. е. увеличение тока в таких системах, приводит как к увеличению нагрева плазмы, так и времени ее удержания [1].

Как показывает теоретический анализ, магнитногидродинамическая (МГД) устойчивость замагниченной плазмы с током при малых q может быть достигнута при использовании вращающихся винтовых мультипольных ВЧ полей [2].

В настоящей работе изложены результаты экспериментальных исследований динамической стабилизации замагниченного тороидального плазменного шнура с квазипостоянным током с помощью винтового ВЧ квадрупольного магнитного поля, полученные на установке Р-0 [3, 4]. Цель этих исследований состояла в достижении МГД устойчивых состояний плазменного шнура при $q \approx 1$. Хотя установка Р-0 является стелларатором, выводы о МГД устойчивости плазмы в ней могут быть в принципе применены и к системе типа токамак.

Установка, представляет собой трехзаходный стелларатор, имеющий следующие параметры: малый диаметр кварцевой камеры $d = 10$ см, большой диаметр $D = 100$ см, тороидальное квазипостоянное магнитное поле $B_z \leq 8$ кГс длительностью $\tau = 15$ мсек, электрическое поле, создающее квазипостоянный ток в плазме, $E_z \leq 0,4$ в/см длительностью 1,2 мсек; вращающееся винтовое ВЧ магнитное поле с $\omega = 3 \cdot 10^6$ сек⁻¹,

длительностью $\sim 1,5$ мсек и напряженностью на границе плазменного шнура $V_\phi \leq 300$ гс создавалось 8-ю винтовыми витками, делающими один оборот вокруг малого периметра при обходе по большому периметру камеры. Эксперименты проводились при угле прокручивания силовой линии на граничной поверхности стеллараторного магнитного поля $i_0 = \pi$. Рабочим газом служил гелий. Форплазма создавалась с помощью отдельного ВЧ генератора.

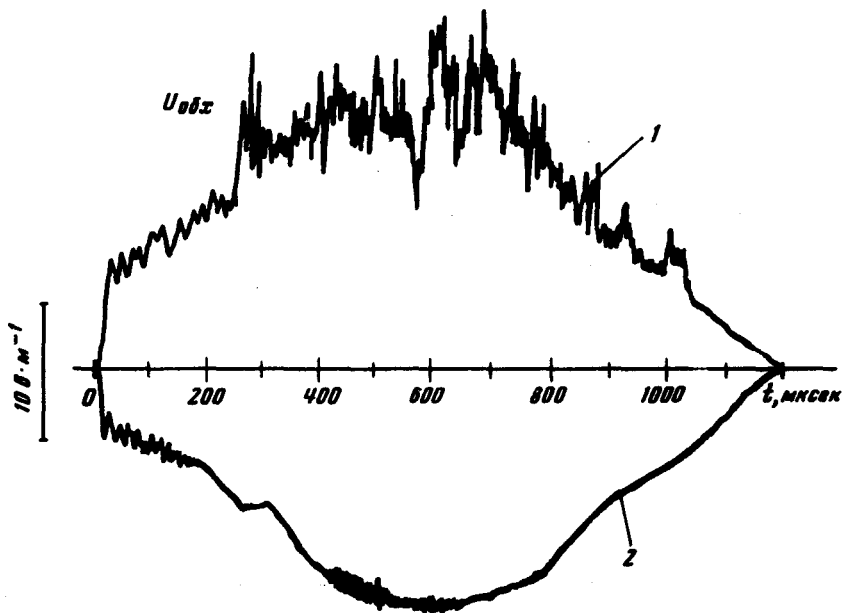


Рис. 1. Осциллограммы напряженности электрического поля E_z :
1 — без включения стабилизирующего ВЧ поля, 2 — при включенном стабилизирующем ВЧ поле. $\rho = 4,5 \cdot 10^{-4}$ мор, $B_z = 6$ кгс

Как показали эксперименты, проведенные без включения ВЧ квадрупольного поля, для данной величины B_z существует предельное значение $I_{p\text{кр}}$, выше которого ток в плазме не растет при увеличении электрического поля E_z . С ростом B_z значение критического тока увеличивается. Протекание квазипостоянного тока сопровождается развитием неустойчивости плазменного шнура, которая особенно возрастает при достижении током критического значения. При $I_p = I_{p\text{кр}}$ наблюдаются резкие сбросы энергии плазменного шнура. Отсутствие устойчивости плазменного шнура проявляется в виде низкочастотных колебаний напряжения на обходе, рис. 1 (1), тока I_p , рис. 2 (1), диамагнитных сигналов, сигналов с электрического зонда и плотности плазмы, измеренной с помощью микроволнового интерферометра с $\lambda = 2,3$ мм. Анализ фотографий развертки свечения плазменного шнура во времени полученных с помощью электронно-оптического преобразователя, указывает на развитие крупномасштабных винтовых возмущений с $m = 2, 3$. В этих режимах температура плазмы ($n \approx 10^{13}$ см $^{-3}$) не превышает $T \approx 20 + 30$ эв. Такое поведение разрядов аналогично режимам на токамаках при малых q и стеллараторах с омическим токовым нагревом.

При наложении на токонесущий плазменный шнур стабилизирующего ВЧ квадрупольного магнитного поля картина существенно меняется. Соответствующие осциллограммы, характеризующие разряд со стабилизирующим ВЧ полем, приведены на рис. 1 (2) и рис. 2 (2). Они показывают, что уровень низкочастотных колебаний резко падает. Одновременно исчезают винтовые структуры на развертке свечения плазменного шнура.

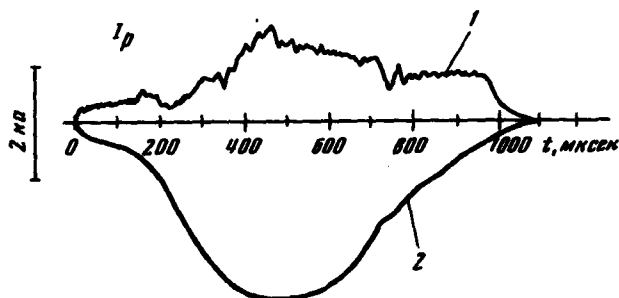


Рис. 2. Осциллограммы тока в плазме I_p : 1 — без включения стабилизирующего поля, 2 — при включенном стабилизирующем ВЧ поле. $\rho = 4,5 \cdot 10^{-4}$ тор, $B_z = 6$ кГс

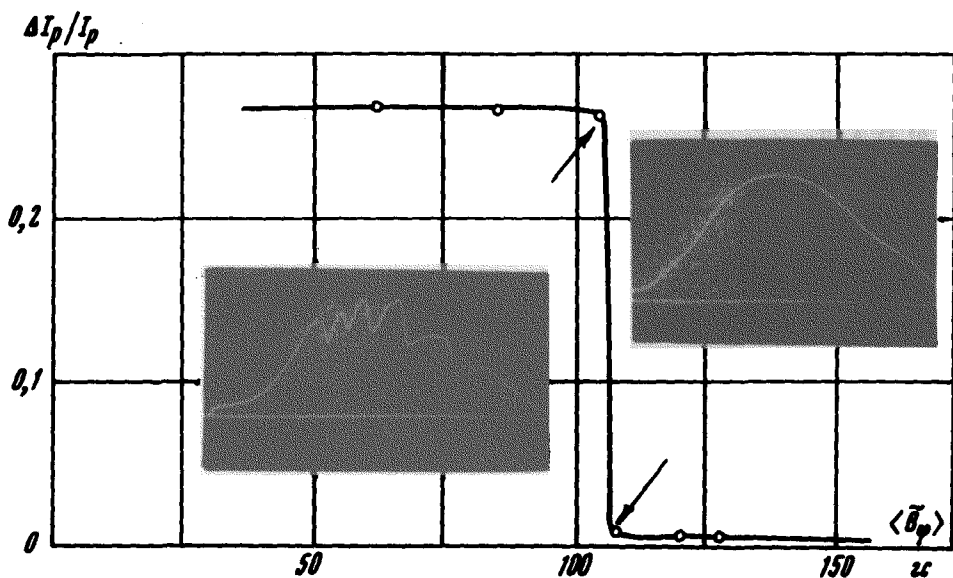


Рис. 3. Зависимость относительной амплитуды колебаний тока $\Delta I_p / I_p$ от напряженности стабилизирующего ВЧ поля. $I_p = 3$ кА, $B_z = 6$ кГс

В стабилизированном режиме квазипостоянный ток в плазме может в несколько раз (2 — 3) превышать значение критического тока $I_{кр}$. Характерной особенностью стабилизированного режима разряда является пороговая зависимость макроскопической устойчивости шнура от соотношения между напряженностью ВЧ поля на границе плазмы и напряженностью поля тока. При данном значении квазипостоянного тока в

плазме необходимо, чтобы напряженность ВЧ поля была больше определенной величины, рис. 3. Отношение $\langle \tilde{B}_\phi \rangle / \bar{B}_\phi$ для данных экспериментов равно $\langle \tilde{B}_\phi \rangle / \bar{B}_\phi \approx 0,65$, т. е. отношение ВЧ давления к давлению полоидального поля $\eta = \tilde{p} / \bar{p} \approx 0,4$. При $\eta < 0,4$ опять наступает срыв тока и разряд становится неустойчивым.

Как показали измерения, проведенные с помощью электрических и магнитных зондов, в стабилизированном режиме плазма локализована в пределах граничной магнитной поверхности. Диамагнитная температура плазмы в стабилизированном режиме при $n_e \approx 2,5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ достигает 100 – 150 эв.

Эффективный запас устойчивости $q_{\text{эфф}}$ ($q_{\text{эфф}} = 2\pi / (i_0 + i)$), где i_0 – угол прокручивания силовой линии стеллараторного магнитного поля на границе шнура, а i – угол прокручивания, создаваемый квазипостоянным током) в стабилизированном режиме равняется $q_{\text{эфф}} \approx 1$. В стабилизированном режиме давление ВЧ поля, как и давление поля тока, было существенно меньше давления плазмы, т. е. $\tilde{\beta}_\phi = \tilde{p}_\phi / p \gg 1$, что указывает на эффективный нагрев плазмы протекающими в ней токами.

Выражаем благодарность за помощь в проведении экспериментов Г.И.Астапенко, В.Б.Майбурову, А.М.Абзианидзе, В.М.Соколову, за полезное обсуждение – В.П.Сидорову.

Поступила в редакцию
6 февраля 1973 г.

Литература

- [1] А.А.Арцимович, В.Д.Шафранов. Письма в ЖЭТФ, 15, 72, 1972.
- [2] В.П.Сидоров, Т.Р.Солдатенков. Ядерный синтез, 12, 73, 1972.
- [3] Р.А.Демирханов и др. АЭ, 31, 239, 1970.
- [4] Р.А.Демирханов и др. Препринт ФТИ ГК ИАЭ СССР, Сухуми, №4, 1969.