

## ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТУРБУЛЕНТНОГО ПРЯМОГО РАЗРЯДА

*В.С.Койдан, А.Н.Папырин, А.Г.Пономаренко, Б.А.Яблочников*

Экспериментальному исследованию нагрева плазмы в турбулентном прямом разряде посвящен ряд работ [1-8], однако выяснение механизма и динамики этого явления требует более детальных исследований. Настоящее сообщение посвящено изложению экспериментальных результатов, полученных при исследовании нагрева плазмы током прямого разряда и касающихся динамики этого процесса.

Блок-схема установки представлена на рис.1. Предварительная плазма создавалась пеннинговским разрядом в квазистационарном однородном магнитном поле  $H_0 = 1 + 3$  кэ. Плотность и температура электронов предварительной плазмы измерялись соответственно 8-миллиметровым интерферометром и зондами Ленгмюра. Основной разряд возникал при включении через разрядник емкости  $C = 0,2$  мкф, заряженной до напряжения  $U_0 = 0 + 40$  кэ. Распределение потенциала по длине разряда измерялось ленгмюровскими зондами, которые вводились со стороны заземленного электрода. Плотность тока на оси разряда и энергетическое распределение токовых электронов измерялись с помощью электростатического анализатора, располагавшегося также в заземленном электроде. Резонансные волномеры с  $\lambda = 3 + 100$  см, подключавшиеся непосредственно к цилиндру Фарадея анализатора, позволяли определить спектральный состав колебаний, возникающих при протекании тока. Другие методы диагностики схематически представлены на рис.1.

Экспериментально было установлено, что величина поглощаемой в плазме энергии, вольт-амперные характеристики и активное сопротивление разряда, падение потенциала на столбе, спектр ВЧ и НЧ коле-

баний существенно зависят от параметров предварительной плазмы и определяются, как правило, отношением  $\eta = i_{\sim} / i_0$ . Величина  $i_{\sim} = \tilde{U} / \rho S$ , где  $\rho = \sqrt{L/C}$ ,  $S$  – сечение токового канала, зависящее на начальной стадии от скин-эффекта; а  $i_0 \approx en\sqrt{kT_e/m}$ , где  $n_0$  и  $T_e$  – плотность и температура электронов предварительной плазмы. Если  $\eta < 1$ , поглощение энергии мало, а величина потенциала и его распределение в плазме определяются обычными парными столкновениями и граничными условиями на электродах.

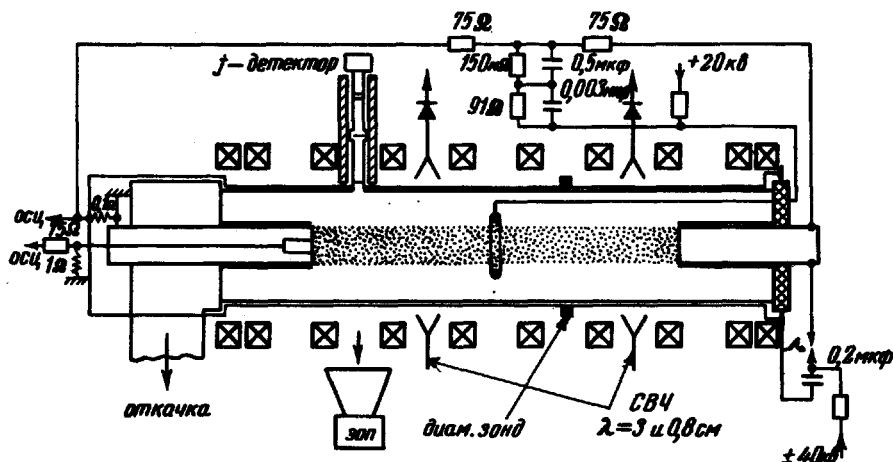


Рис. 1. Блок-схема установки

Иная картина наблюдается при  $\eta \geq 1$ . На рис. 2, а-в представлена типичная зависимость во времени основных параметров, характеризующих возникновение турбулентного режима. Вначале, до достижения  $\eta \lesssim 1$  (на рис. 2, а этот момент отмечен звездочкой), ток в плазме определяется волновым сопротивлением. Условие наступления турбулентности  $\eta \geq 1$  было экспериментально проверено следующим образом. При фиксированном напряжении  $\tilde{U}_0 = 30$  кВ режимом предварительного разряда оказывалось возможным в широком диапазоне  $n_0 = 5 \cdot 10^{11} + 2 \cdot 10^{13}$  см<sup>-3</sup> изменять концентрацию электронов, а выбором соответствующей задержки запуска основного разряда – величину электронной температуры. Последнее обстоятельство обеспечивало линейную зависимость  $i_0$  от плотности электронов.

На рис. 2, б нанесены экспериментальные значения плотности тока, протекающего в плазме  $j^*$ , начиная с которого наступал турбулентный режим. На этом же графике представлена зависимость  $\Delta \Phi = \Delta H S$  диамагнитного сигнала от плотности предварительной плазмы. Далее

было установлено, что при  $\eta \gtrsim 1$  возникновение неустойчивости сопровождается возбуждением ВЧ колебаний ( $\omega \sim \omega_{oe}$ ) и НЧ колебаний ( $\omega \gtrsim \omega_{oi}$ ). Одновременно возрастает активное сопротивление плазмы, что вызывает повышение напряжения на столбе (см. рис.2,а).

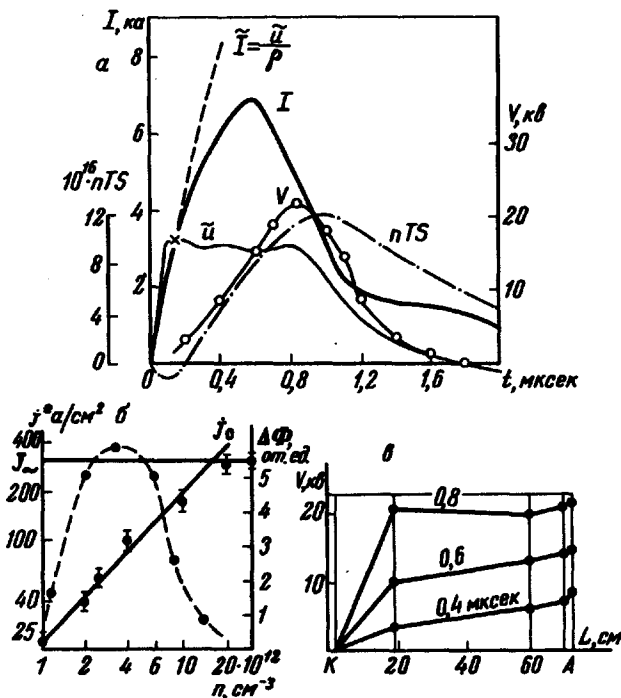


Рис. 2. а) Вольтамперные характеристики прямого разряда.  $I$  – ток разряда,  $\tilde{U}$  и  $V$  – соответственно полное и активное напряжение на плазменном столбе,  $nTS$  – диамагнитный сигнал. Режим:  $n_0 = 2 \cdot 10^{12}$  см<sup>-3</sup>,  $\tilde{U}_0 = 30$  кВ,  $H_0 = 1,8$  кэ, рабочий газ – воздух. б) Зависимость критической плотности тока  $j^*$  и диамагнитного сигнала от концентрации предварительной плазмы. в) Распределение потенциала по длине разряда.

Из рис.2,а видно, что поглощение мощности и диамагнитный сигнал возрастают одновременно с ростом активного напряжения  $V$ . Эффективная частота столкновений оценивалась из величины сопротивления плазмы, а также из уравнения

$$\frac{ne^2}{m} E(z) + \frac{e}{m} \nabla p_e = i \nu_{эфф} \phi,$$

где  $E(z)$  и  $\nabla p_e$  определялись, соответственно, из распределения потенциала и диамагнитного сигнала в предположении, что  $\rho_{\perp} \approx \rho_{\parallel}$ . Оказалось, что  $\nu_{эфф}$  меняется в пределах  $5 \cdot 10^8 + 3 \cdot 10^9$  сек<sup>-1</sup> на разных стадиях неустойчивости и хорошо согласуется с наблюдавшимся спектром НЧ колебаний и зависимостью его от времени.

Динамика нагрева плазмы в результате развития неустойчивости хорошо видна из измерений распределения токовых электронов по энергиям, которые проводились многосеточным анализатором с тормозящим потенциалом. На рис.3,а, б, в приведены осциллограммы тока раз-

ряда и электронов на коллектор анализатора при различных значениях задерживающего потенциала. Построенные в полулогарифмическом масштабе кривые задержки (рис.3,з) указывают на то, что спектр элек-

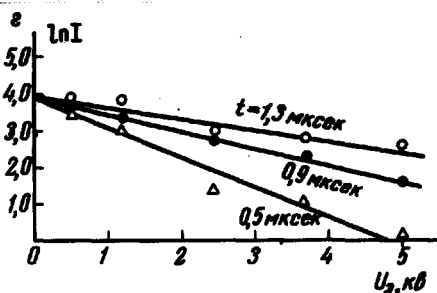
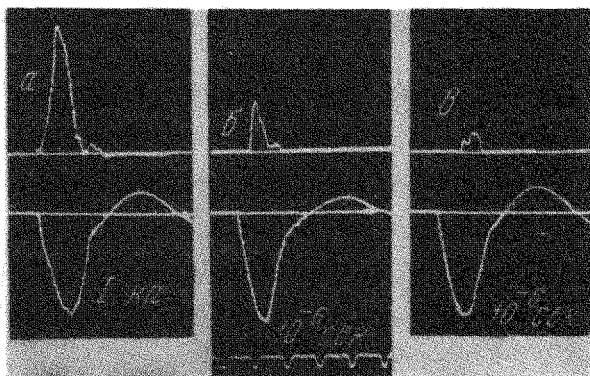


Рис. 3. Зависимость тока на коллектор анализатора от задерживающего потенциала.  $\tilde{U}_0 = 10$  кэ,  $n_0 = 2 \cdot 10^{12}$  см<sup>-3</sup>,  $H_0 = 1$  кэ, рабочий газ – воздух. а)  $U_3 = 0$  кэ,  $i_{a ср} = 90$  а/см<sup>2</sup>,  $i_{a ос} = 140$  а/см<sup>2</sup>, б)  $U_3 = 2,4$  кэ, в)  $U_3 = 5$  кэ. з) Кривые распределения по энергиям электронов, поступающих на анод разряда.

тронов близок к максвелловскому, а разрядный ток на анод, по-видимому, определяется хаотическим электронным током  $i_a = e n v(T_e)/4$ . Измеряя анализатором величину  $i_a$  и определив из наклона полулогарифмических характеристик  $T_{eH}$ , оказалось возможным оценить плотность нагретых электронов. Для трех моментов времени получены следующие данные:

$$\begin{aligned}
 t_1 &= 0,5 \text{ мксек}, T_e \approx 1,2 \text{ кэв}, n \approx 1,2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}; \\
 t_2 &= 0,9 \text{ мксек}, T_e \approx 2,1 \text{ кэв}, n \approx 1,4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}; \\
 t_3 &= 1,3 \text{ мксек}, T_e \approx 3,0 \text{ кэв}, n \approx 5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}.
 \end{aligned}$$

Следовательно, можно утверждать, что по мере протекания тока и увеличения активного напряжения на плазме, значение  $T_{eH}$  возрастает и достигает максимального значения в момент наибольшего поглощения энергии в разряде. Плотность горячих электронов оказалась весь-

ма близка к плотности предварительной плазмы, а уменьшение ее к моменту максимального нагрева связано, вероятно, с расширением плазменного шнура. Поперечная температура  $T_{\perp}$ , измеренная диамагнитным зондом и рентгеновским детектором методом сменных фильтров, удовлетворительно совпадает со значением  $T_{\parallel}$ , как по величине, так и по характеру зависимости от времени.

Таким образом, при нагреве плазмы током прямого разряда в данных опытах на динамику развития турбулентности существенно влияют параметры предварительной плазмы, но поскольку еще не проведены измерения степени хаотичности наблюдаемых ВЧ и НЧ колебаний, высказывать соображения о конкретном механизме нагрева весьма затруднительно.

Более детальное изложение результатов исследования динамики турбулентного нагрева плазмы в прямом разряде авторы предполагают опубликовать в ближайшее время.

В заключение выражаем искреннюю благодарность чл.-корр. АН СССР Р.З.Сагдееву и доктору физ.-мат. наук Ю.Е.Нестерихину за интерес к работе, В.Н.Стибунову за участие в экспериментах.

Поступило в редакцию  
17 июля 1968 г.

### Литература

- [1] М.В.Бабыкин, П.П.Гаврин, Е.К.Завойский, Л.И.Рудаков, В.А.Скорюпин. ЖЭТФ, 47, 1597, 1964.
- [2] М.В.Бабыкин, П.П.Гаврин, Е.К.Завойский, С.Л.Недосеев, Л.И.Рудаков, В.А.Скорюпин. ЖЭТФ, 52, 643, 1967.
- [3] А.И.Бабичев, А.И.Карчевский, Ю.А.Муромкин, Е.М.Буряк. ЖЭТФ, 53, 3, 1967.
- [4] В.А.Симонов, В.В.Абозовик, В.В.Игнатъев. Вторая Международная конференция по физике плазмы, КАЛЭМ, Англия, 1965, докл. № 21/167.
- [5] Л.В.Дубовой, В.П.Федяков. ДАН СССР, 167, 553, 1966.
- [6] Е.А.Сухомлин, Н.И.Рева, В.А.Супруненко, В.Т.Толок. Письма ЖЭТФ, 1, 245, 1965.
- [7] Е.К.Завойский, С.Л.Недосеев, Л.И.Рудаков. Письма ЖЭТФ, 6, 951, 196.
- [8] I.N.Jensen, F.R.Scott. Phys. Rev. Lett., 19, 1100, 1967.