

04;12

## Пристеночная электронная неустойчивость плазменного потока

© К.П. Кирдяшев

Институт радиотехники и электроники РАН, Фрязино

*Поступило в Редакцию 16 августа 1996 г.*

В работе получены экспериментальные данные, свидетельствующие об особенностях плазмоповерхностного взаимодействия, приводящего к эмиссии электронов со стенок ускорительного канала и развитию специфической пучковой неустойчивости плазменного потока.

Исследование устойчивости динамики электронного компонента в плазменных системах с замкнутым дрейфом электронов имеет особое значение в связи с оценкой вклада возбуждаемых колебаний в поперечную проводимость плазмы и эффективность взаимодействия электронов со стенками ускорительного канала [1–2]. Наблюдаемое возбуждение высокочастотных колебаний [3–5] свидетельствует о развитии электронной неустойчивости плазменного потока в области частот и масштабов возмущений, когда неприменимо дрейфовое приближение для описания динамики электронного компонента плазмы. При этом спектр неустойчивости соответствует возбуждению электронных ленгмюровских колебаний, что не находит объяснения в рамках существующих представлений о процессах в ускоряющей области плазменного потока.

В представленном сообщении рассмотрены результаты экспериментальных исследований высокочастотных волновых процессов при стендовых испытаниях стационарного плазменного двигателя СПД-70 [5] и дана их интерпретация на основе представлений о взаимодействии плазменного потока с диэлектрическими стенками ускорительного канала. Для регистрации полей плазменных волн применена зондовая методика измерений, предусматривающая введение индуктивной связи в конструкцию двухпроводного высокочастотного зонда для обеспечения развязки по постоянному напряжению регистрирующей части зонда с измерительным устройством. Применение зонда, находящегося под плавающим потенциалом, сводило к минимуму искажения регистриру-

емых полей в плазме и исключало возможные электрические пробои через измерительные цепи в области плазменного потока с распределенным электрическим полем. Локальность измерений полей плазменных волн определялась размерами регистрирующей части зонда ( $\sim 1$  мм), соответствующими возможным масштабам возмущений высокочастотного электрического поля в плазме. Частотная характеристика зонда оказалась существенно неравномерной вследствие индуктивной связи в высокочастотном измерительном тракте и влияния шунтирующих емкостей, приводящих к проявлению резонансных свойств зонда в области частот 3–5 ГГц. Для исключения влияния частотных свойств зонда на спектры регистрируемых полей в исследуемом потоке плазмы произведены спектральные измерения интенсивности полей плазменных волн в эталонном источнике — газоразрядной плазме с тепловым уровнем шумов, определяемым соотношением для спектральной плотности энергии [3]:

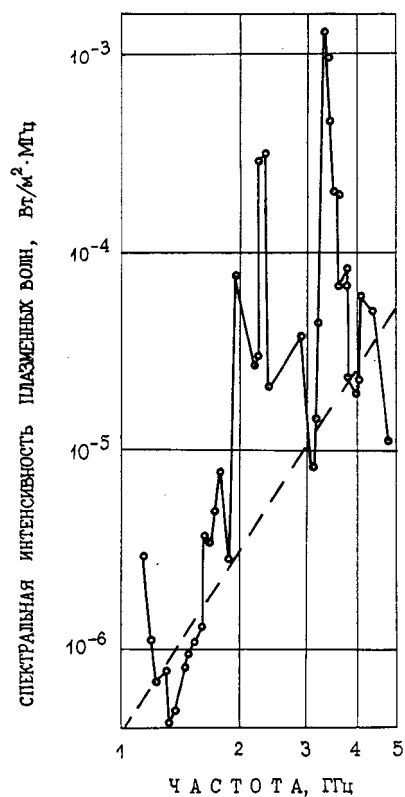
$$W_0 = kT_e / (12\pi^2 d_e^3 \Delta f),$$

в котором  $T_e$  — электронная температура,  $d_e$  — дебаевский радиус электронов,  $\Delta f$  — ширина спектра плазменных колебаний, приближенно определяемая эффективной частотой электронных столкновений. Для эталонного источника шумов преобладают столкновения электронов с нейтральными частицами и при заданном давлении газа в источнике и температуре электронов величина  $\Delta f$  составляет  $\sim 1$ – $2$  ГГц. Примененная методика измерений основана на сравнении интенсивностей регистрируемых сигналов при калибровке и измерениях и учете неравномерности частотной характеристики высокочастотного тракта измерительного устройства.

Спектр высокочастотной неустойчивости плазменного потока сосредоточен на частотах 1–5 ГГц, что соответствует возбуждению электронных колебаний во внешней пристеночной области ускорительного канала с концентрацией электронов  $10^{10}$ – $2 \cdot 10^{11}$  см $^{-3}$  (концентрация электронов в центральной части кольцевого сечения потока по данным зондовых измерений составляет  $\sim 10^{12}$  см $^{-3}$  при температуре 10–12 эВ). Представленная на рис. 1 спектральная интенсивность потока энергии плазменных волн сопоставлена с тепловым уровнем

$$S_0 = W_0 v_{Te} \varepsilon^{1/2} / (1 - \varepsilon) \approx 4 \cdot 10^{-7} f^3 [\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{МГц})],$$

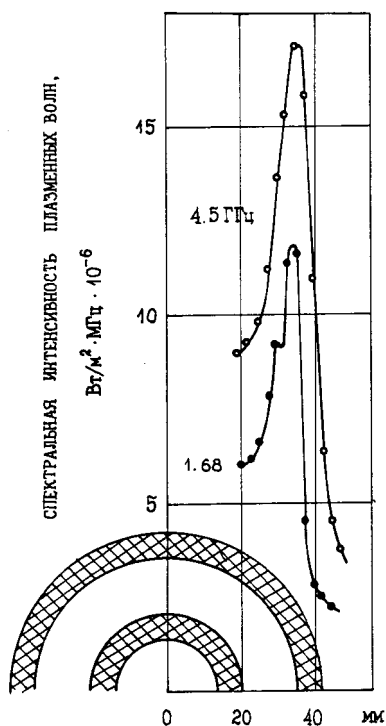
где  $\varepsilon = 1 - \omega_{pe}^2 / \omega^2$ ,  $\omega_{pe}$  — электронная плазменная частота,  $v_{Te}$  — тепловая скорость электронов плазмы, что позволило выявить в спектре



**Рис. 1.** Спектр интенсивности высокочастотных полей во внешней пристеночной области плазменного потока (пунктиром обозначена частотная зависимость теплового уровня интенсивности плазменных колебаний при температуре электронов 10 эВ).

высокочастотных полей в неоднородном по сечению и длине плазменном потоке области возбуждения надтепловых электронных колебаний, обусловленных развитием неустойчивости.

Распределения интенсивности полей плазменных волн на различных частотах по сечению плазменного потока свидетельствуют о преимущественной локализации неустойчивости вблизи внешней стенки



**Рис. 2.** Распределение интенсивности высокочастотных полей на различных частотах по сечению плазменного потока за срезом ускорителя (представлена конфигурация внешней и внутренней диэлектрических стенок ускорительного канала).

ускорительного канала (рис. 2), на поверхности которой в наибольшей степени проявляется аномальная эрозия диэлектрика [6]. При этом отмечена менее выраженная неустойчивость плазменного потока вблизи внутренней стенки канала. Распределение интенсивности по длине от среза ускорительного канала характеризуется спадом интенсивности до величин, соответствующих тепловому уровню, что связано с механизмом столкновительного затухания плазменных волн, выходящих из области локализации неустойчивости.

Как показали эксперименты, проведенные при длительных испытаниях стационарного плазменного двигателя [4], возбуждение электронной неустойчивости плазменного потока проявляется на определенной стадии эксплуатации плазменной установки в режимах с развитой эрозированной структурой диэлектрических стенок ускорительного канала [6]. Неустойчивость носит нестационарный характер с длительностью выбросов огибающей высокочастотных колебаний 100–200 мкс, существенно превышающей характерные времена волновых возмущений типа ионизационных волн, контурных и пролетных колебаний, возбуждаемых в ускорительном канале. Отмечен незначительный коэффициент корреляции в выбросах излучения на различных частотах, что объясняется формированием электромагнитного поля независимыми источниками излучения из различных по концентрации электронов областей плазменного потока.

Полученные экспериментальные данные позволяют рассматривать определяющую роль эмиссии электронов со стенок ускорительного канала в развитии специфической пучковой неустойчивости плазменного потока. Существенный для рассматриваемой неустойчивости механизм эмиссии и ускорения электронов согласуется с представлением о мерцании и мозаичности дебаевского скачка потенциала при взаимодействии замагниченных электронов со стенками ускорительного канала [1–2]. Связь наблюдаемой пучковой неустойчивости с режимами аномальной эрозии стенок ускорительного канала указывает на проявление механизма неравновесной эмиссии электронов, вызванной разрушением поверхности и рекомбинацией дефектов в структуре диэлектрика. Длительность эмиссии электронов определяется релаксационным процессом на поверхности локальных сколов и трещин, образующихся в режимах аномальной эрозии стенок ускорительного канала. Изменение интенсивности в выбросах высокочастотных колебаний согласуется с временной зависимостью эмиссионного тока с неравновесной возбужденной поверхности диэлектрика  $j_e(t) \sim t^{-1/2}$  [7].

Результаты работы расширяют представления о механизмах плазмо-поверхностного взаимодействия [2,8] в условиях ускорения плазмы в канале с диэлектрическими стенками. При этом открывается возможность диагностики эрозивных процессов средствами дистанционных измерений, обеспечивающих прогнозирование ресурса работы установок и выбор материалов элементов конструкции, устойчивых к длительному воздействию плазмы.

Автор выражает благодарность А.И. Бугровой и А.И. Морозову, принявшим участие в обсуждении полученных результатов, а также Ю.А. Ермакову и В.Л. Зарембо за помощь в проведении экспериментов.

## Список литературы

- [1] *Бугрова А.И., Морозов А.И., Харчевников В.К.* // Физика плазмы. 1990. Т. 16. В. 12. С. 1469–1481.
- [2] *Морозов А.И.* Физические основы космических электрореактивных двигателей. М.: Атомиздат, 1997. С. 328.
- [3] *Кирдяшев К.П.* Высокочастотные волновые процессы в плазмодинамических системах. М.: Энергоатомиздат, 1982. С. 142.
- [4] *Брухтий В.И., Кирдяшев К.П., Зарембо В.Л., Светлицкая О.Э.* // ЖТФ. 1996. Т. 66. В. 2. С. 68–73.
- [5] *Bugeat J.P., Ermakov Yu.A., Zarembo V.L., Kirdyashev K.P.* // II German-Russian Conf. on Electric Propulsion Engines and Their Technical Applications. М., 1993. Р. 38.
- [6] *Архипов Б.А., Гнздор Р.Ю., Масленников Н.А., Морозов А.И.* // Физика плазмы. 1992. Т. 18. В. 9. С. 1241–1244.
- [7] *Молоцкий М.И.* // Тез. докл. I Всесоюз. научного совещания "Экзоэлектронная эмиссия и ее применение". Свердловск, 1979. С. 125–128.
- [8] *Войцень В.С., Гужова С.К., Титов В.И.* Воздействие низкотемпературной плазмы и электромагнитного излучения на материалы. М.: Энергоатомиздат, 1991. С. 224.