

04

## Низкочастотные спектры электронных колебаний в плазменном двигателе СПД-АТОН

© К.П. Кирдяшев, А.И. Бугрова, А.В. Десятков, В.К. Харчевников

Институт радиотехники и электроники РАН, Фрязино  
Московский институт радиотехники, электроники и автоматики  
(технический университет), Москва

Поступило в Редакцию 29 июля 2008 г.

Представлены результаты экспериментального исследования электростатических колебаний, возбуждаемых в стационарном плазменном двигателе СПД-АТОН в диапазоне частот, соответствующем низкочастотной ветви электронных колебаний. Обоснован механизм неустойчивости плазменного потока в области захвата электронов в магнитное поле ускорительного канала.

PACS: 52.75.Di, 2.30.-q, 52.70.Gw

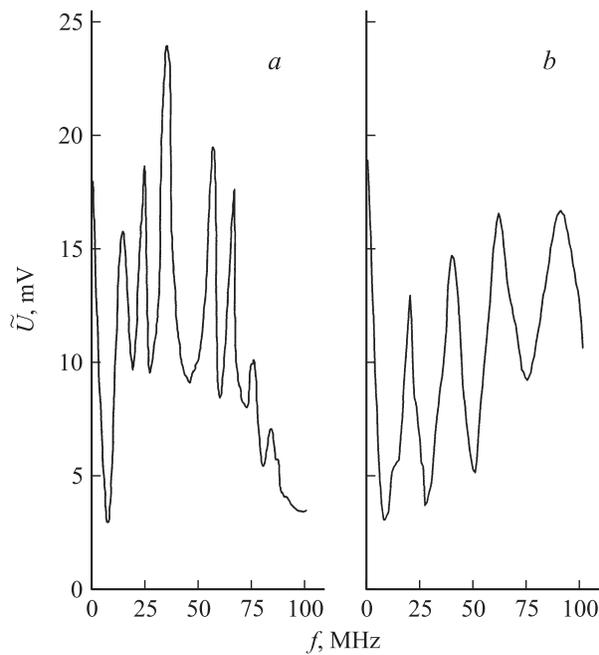
Ускорение плазмы в стационарном плазменном двигателе (СПД) сопровождается развитием различных типов неустойчивостей и возбуждением колебаний в зоне ускорения плазмы и в неравновесной области выходящего плазменного потока. Наиболее полно исследованы спектральные особенности и условия генерации колебаний на частотах до 10 МГц, которые связаны с ионизационной неустойчивостью плазмы и неоднородным электронным дрейфом в области ускорения плазмы [1–3]. В диапазоне частот свыше 500 МГц возбуждение колебаний, приводящих к аномальной поперечной проводимости плазмы и электромагнитному излучению СПД, обусловлено развитием пучковой неустойчивости плазменного потока на высокочастотной ветви электронных колебаний [4–5]. В промежуточной области частот (порядка 100 МГц) наблюдалось возбуждение достаточно интенсивных колебаний, однако имеющиеся экспериментальные данные не позволяют однозначно судить о механизме неустойчивости в этой области частот и возможном вкладе возбуждаемых колебаний в турбулентные эффекты, возникающие при ускорении плазмы и формировании плазменных потоков.

В данной работе проведено экспериментальное исследование электростатических колебаний, возбуждаемых в диапазоне частот 10–100 МГц в различных зонах плазменного потока, создаваемого перспективной моделью стационарного плазменного двигателя СПД-АТОН [6,7]. Особое внимание обращено на область плазменного потока, в которой осуществляется эмиссия электронов из катода-компенсатора и захват их в магнитное поле ускорительного канала. При проведении экспериментов рассматривались различные конфигурации магнитного поля в ускорительном канале, приводящие к формированию плазменных потоков с различной степенью расходимости.

Регистрация электростатических колебаний в плазме проводилась с помощью плоских зондов с площадью рабочей поверхности  $0.2 \text{ mm}^2$ , что обеспечивало необходимую локальность измерений полей плазменных волн в различных зонах плазменного потока. Согласованность волнового сопротивления зонда с входами анализатора спектра и записывающего осциллографа обеспечивала необходимую однородность частотной характеристики приемного тракта в исследованном диапазоне частот. Поскольку измерения интенсивности колебаний проводились на частотах, превышающих нижнюю гибридную частоту (порядка 1 МГц), регистрируемые зондом сигналы соответствовали колебаниям электронного компонента плазмы в магнитном поле ускорительного канала.

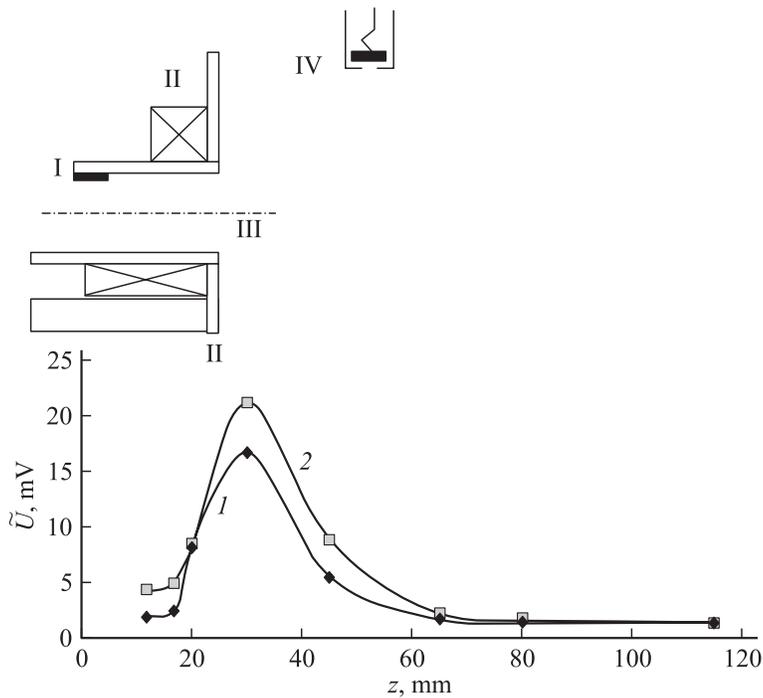
Проведенные в работе измерения свидетельствуют о возбуждении колебаний потенциала в выделенных зонах неустойчивости плазменного потока, существенно превосходящих уровень тепловых плазменных флуктуаций. Характерно, что интенсивность колебаний в выходящем плазменном потоке превосходит интенсивность колебаний в ускорительном канале. Согласно оценкам, проведенным с учетом влияния размеров регистрирующей части зондов на результаты измерений, амплитуда колебаний возбуждаемых плазменных волн достигает 1–5 V для масштабов возмущений потенциала, соответствующих поперечному размеру плазменного потока.

При рассмотрении спектров возбуждаемых колебаний (рис. 1) обращает на себя внимание наличие в них спектральных составляющих приблизительно на кратных частотах. Для выбранного режима формирования плазменного потока эти составляющие в структуре спектров оказываются неизменными в различных зонах генерации колебаний. Распределение интенсивности колебаний по длине плазменного потока (рис. 2) свидетельствует о локализации источника возбуждаемых



**Рис. 1.** Спектры электростатических колебаний в СПД-АТОН в различных режимах формирования плазменных потоков: *a* — традиционная конфигурация магнитного поля в ускорительном канале, *b* — режим сфокусированного плазменного потока.

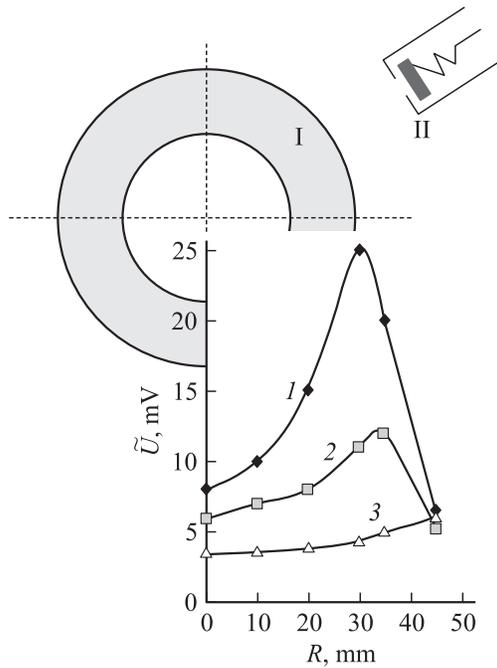
колебаний в области эмиссии электронов из катода-компенсатора и захвата их в магнитное поле ускорительного канала. Подобие структуры спектров колебаний в различных зонах плазменного потока указывает на механизм переноса электронных возмущений из внешней области выходящего плазменного потока в ускорительный канал. Из радиальных распределений интенсивности колебаний (рис. 3) следует, что соответствующая возбуждению колебаний неустойчивость в наибольшей степени проявляется на периферии плазменного потока. В проведенных экспериментах не выявлено существенного различия в интенсивности колебаний, регистрируемых с диаметрально расположенных зондов, что позволяет рассматривать в качестве источника колебаний кольцевую аксиально-симметричную область на периферии выходящего плазменного потока.



**Рис. 2.** Распределение амплитуды колебаний потенциала по длине плазменного потока: 1 — сфокусированный плазменный поток; 2 — расходящийся плазменный поток; I — анод; II — магнитная система; III — ускорительный канал; IV — катод-компенсатор.

На основе полученных экспериментальных данных рассмотрен возможный механизм неустойчивости плазменного потока, проявляющийся в возбуждении колебаний в исследованном диапазоне частот 10–100 МГц. Результаты проведенных спектральных измерений свидетельствуют о неустойчивости плазмы СПД на низкочастотной ветви электронных колебаний. Действительно, при измеренных в эксперименте значениях концентрации электронов и напряженности магнитного поля спектры экспериментально наблюдаемых колебаний соответствуют частотам собственных электронных колебаний плазмы в магнитном поле [8]:

$$\omega_-(\theta) = \omega_{pe} \cos \theta / (1 + \omega_{pe}^2 / \omega_{ce}^2)^{1/2},$$



**Рис. 3.** Распределение амплитуды колебаний в поперечном сечении плазменного потока: 1 — вблизи среза ускорительного канала, 2 — на расстоянии от среза 23 mm, 3 — 43 mm, I — сечение ускорительного канала; II — область катода-компенсатора.

которые зависят от угла  $\theta$  между волновым вектором возбуждаемых плазменных волн и магнитным полем (здесь  $\omega_{pe}$  и  $\omega_{ce}$  — плазменная и циклотронная частоты электронов соответственно). В области захвата электронов в магнитное поле ускорительного канала выполняется соотношение  $\omega_{pe} \gg \omega_{ce}$  и частоты возбуждаемых колебаний в зависимости от угла распространения плазменных волн можно представить в виде  $\omega_-(\theta) = \omega_{ce} \cos \theta$ . Максимальная частота в спектре колебаний определяется циклотронной частотой электронов  $\omega_{ce}$  для плазменных волн, распространяющихся вдоль магнитного поля. По данным измерений напряженности магнитного поля за срезом ускорительного канала циклотронная частота составляет 100–150 MHz, что согласуется с максимальными значениями частот в спектрах наблюдаемых колебаний

(рис. 1). Для плазменных волн, распространяющихся поперек магнитного поля, следует учитывать вклад ионов в возбуждение колебаний. По этой причине минимальные значения частот колебаний определяются величиной нижней гибридной частоты, что подтверждается результатами проведенных спектральных измерений. Локальный спектр частот возбуждаемых колебаний можно представить в виде зависимости частоты от углового разброса направлений распространения плазменных волн относительно магнитного поля, изменяющегося в пределах  $\pi/2$ . В связи с этим ширина спектра колебаний определяется локальными значениями  $\omega_{ce}$  в зонах эмиссии электронов и захвата их в магнитное поле ускорительного канала.

При рассмотрении механизма неустойчивости плазмы СПД в исследованном диапазоне частот следует исходить из представления о развитии пучковой неустойчивости плазменного потока, соответствующей пересечению циклотронной ветви колебаний с ветвями собственных электронных колебаний плазмы [8]. Такое представление основывается на формировании азимутального пучка электронов в периферийной области выходящего плазменного потока, приводящего к экспериментально наблюдаемому фазовому сдвигу колебаний со смещенных по углу зондов. С возбуждением азимутальных плазменных волн связана особенность спектров колебаний, проявляющаяся в наличии спектральных составляющих на кратных частотах (рис. 1), которые могут быть связаны с дискретностью значений азимутальных волновых чисел возбуждаемых плазменных волн. Частоты этих составляющих при развитии в плазменном потоке конвективной неустойчивости можно представить в виде  $\omega_m = (2\pi m/R_0)V_\phi$ , зависящем от текущего радиуса плазменного потока  $R_0$ , номера азимутальной моды колебаний  $m$  и азимутальной скорости электронного пучка  $V_\phi$ . Величину азимутальной скорости электронов можно оценить по потенциалу плазменного потока относительно катода-компенсатора. В условиях проведенных экспериментов величина азимутальной скорости электронов составляет  $(3.5-4.0) \cdot 10^6$  м/с, что позволяет рассматривать возбуждение колебаний на кратных частотах 20, 40, 60 и 80 МГц, соответствующих результатам спектральных измерений (рис. 1). Различие в структуре наблюдаемых спектров колебаний при формировании сфокусированного и расходящегося плазменных потоков связано с различными поперечными размерами областей генерации колебаний. Следует отметить, что исследованная неустойчивость наблюдается в тех же зонах и режимах формирования плазменного потока, в которых наблюдается

неустойчивость плазмы в магнитном поле на высокочастотной ветви электронных колебаний [9,10].

Интенсивность возбуждаемых колебаний можно оценить исходя из представления об усилении тепловых плазменных флуктуаций на линейной стадии развития пучковой неустойчивости плазмы в области захвата электронов в плазменный поток [10]. При этом следует учитывать ограниченность времени взаимодействия электронного пучка с плазмой вследствие неоднородности магнитного поля и изменения фазовой скорости плазменных волн. Нарастание колебаний происходит в ограниченной области плазменного потока, в которой изменение фазовой скорости волн находится в пределах разброса скоростей электронов в пучке. Максимум коэффициента усиления достигается для волновых возмущений, распространяющихся под углом к магнитному полю  $\theta$ , удовлетворяющему условию  $\sin \theta \approx \cos \theta$  [8]. Это означает, что максимум в спектре колебаний проявляется в области частот  $\omega_{\max} \approx 0.7\omega_{ce}$ , что согласуется с результатами проведенных измерений.

Авторы выражают благодарность А.И. Морозову за внимание к работе и обсуждение полученных результатов.

## Список литературы

- [1] Есипчук Ю.В., Морозов А.И., Тилинин Г.Н. и др. // ЖТФ. 1973. Т. XLIII. В. 7. С. 1466–1473.
- [2] Шишкин Г.Г., Герасимов В.Ф. // ЖТФ. 1975. Т. XLV. В. 9. С. 1847–1854.
- [3] Есипчук Ю.В., Тилинин Г.Н. // ЖТФ. 1976. Т. XLVI. В. 4. С. 718–729.
- [4] Кирдяшев К.П., Морозов А.И. // Физика плазмы. 1999. Т. 25. № 4. С. 326–332.
- [5] Кирдяшев К.П. Высокочастотные волновые процессы в плазмодинамических системах. М.: Энергоатомиздат, 1982. С. 142.
- [6] Морозов А.И., Бугрова А.И., Десятсков А.В. и др. // Физика плазмы. 1997. Т. 23. № 7. С. 635–645.
- [7] Bugrova A.I., Desyatskov A.V., Kharchevnikov V.K. et al. // Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Conference on Spacecraft Propulsion. Cannes, 10–13 October 2000. ESA SP-465. P. 881–884.
- [8] Михайловский А.Б. Теория плазменных неустойчивостей. Т. 1. Неустойчивости однородной плазмы. М.: Атомиздат, 1975. С. 272.
- [9] Кирдяшев К.П., Бугрова А.И., Морозов А.И. и др. // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. В. 14. С. 7–15.
- [10] Кирдяшев К.П., Бугрова А.И., Морозов А.И. и др. // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. В. 7. С. 79–87.