

04;10

Спектры СВЧ-колебаний в стационарном плазменном двигателе СПД-АТОН

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

Институт радиотехники и электроники РАН, Фрязино
Московский институт радиотехники, электроники и автоматики
(технический университет)
Институт ядерного синтеза РНЦ „Курчатовский институт“, Москва

Поступило в Редакцию 13 августа 2007 г.

Представлены результаты экспериментального исследования спектров СВЧ-колебаний и электромагнитного излучения стационарного плазменного двигателя СПД-АТОН. На основе данных спектральных измерений и пространственного распределения интенсивности СВЧ-колебаний рассмотрены особенности проявления неустойчивости плазменного потока, связанной с захватом электронов в магнитное поле ускорительного канала. Предложен метод оценки спектральных и энергетических параметров СВЧ-колебаний и электромагнитного излучения, создаваемого плазменным двигателем.

PACS: 52.75.Di, 52.30.-q, 52.70.Gw

Исследование спектров интенсивности и СВЧ-колебаний в стационарном плазменном двигателе (СПД) представляет интерес для выявления качественной картины динамики электронов при ускорении плазмы и оценки вклада колебаний в аномальные эффекты, связанные с поперечной проводимостью плазмы в ускорительном канале и формированием зон электронной неустойчивости плазменного потока [1,2]. Установление связи спектров СВЧ-излучения со спектрами полей плазменных волн расширяет возможности дистанционных методов исследования неравновесных процессов в СПД при стендовых испытаниях космических двигательных установок. К тому же знание спектров электромагнитного излучения СПД позволяет оценить помехоустойчивость систем космической радиосвязи при воздействии на бортовую радиоэлектронную аппаратуру помех, создаваемых двигательной установкой [3].

В данной работе проведено экспериментальное исследование локальных спектров СВЧ-колебаний, возбуждаемых в различных зонах плазменного потока на выходе из ускорительного канала СПД. Проведенное исследование представляет интерес для выявления механизма генерации СВЧ-колебаний в процессе захвата электронов в магнитное поле ускорительного канала и определения вклада выделенных зон генерации СВЧ-колебаний в формирование спектра электромагнитного излучения. Эксперименты проводились при стендовых испытаниях перспективной модели стационарного плазменного двигателя СПД-АТОН в режимах, соответствующих малой расходимости выходящего плазменного потока и высоким интегральным показателям двигательной установки [4,5].

В процессе испытаний проводилась регистрация спектров СВЧ-излучения и полей плазменных волн в диапазоне 1.05–7.15 GHz, перекрывающем частоты высокочастотной ветви электронных колебаний в ускорительном канале, выходящем плазменном потоке и в области катода-компенсатора. Исследование локальных спектров полей плазменных волн проводилось с помощью двухпроводных зондов, обладающих индуктивной связью с высокочастотным трактом измерительного устройства [6]. Такая конструкция зондов обеспечивала необходимую развязку по постоянному току областей генерации СВЧ-колебаний и регистрирующих элементов измерительной аппаратуры. При этом исключались возможные искажения в распределении потенциала электрического поля в выделенных зонах плазмы СПД. Для регистрации электромагнитного излучения применялись широкополосные антенны, расположенные вблизи диэлектрической стенки вакуумной камеры экспериментальной стендовой установки. Спектральные измерения интенсивности СВЧ-колебаний электромагнитного излучения проводились при скорости частотного сканирования измерительных приемников, обеспечивающей выделение составляющих спектра в полосе до 1 MHz. Соответствующее временное разрешение в процессе последовательного спектрального анализа огибающей СВЧ-колебаний составляло 0.1–1 s. Определение областей частот с неравновесным характером возбуждаемых колебаний производилось путем сравнения результатов измерений с тепловым уровнем, определяемым по температуре электронов в зонах генерации СВЧ-колебаний [2].

Распределения интенсивности плазменных колебаний на отдельных частотах, представленные на рис. 1, свидетельствуют о максимальном

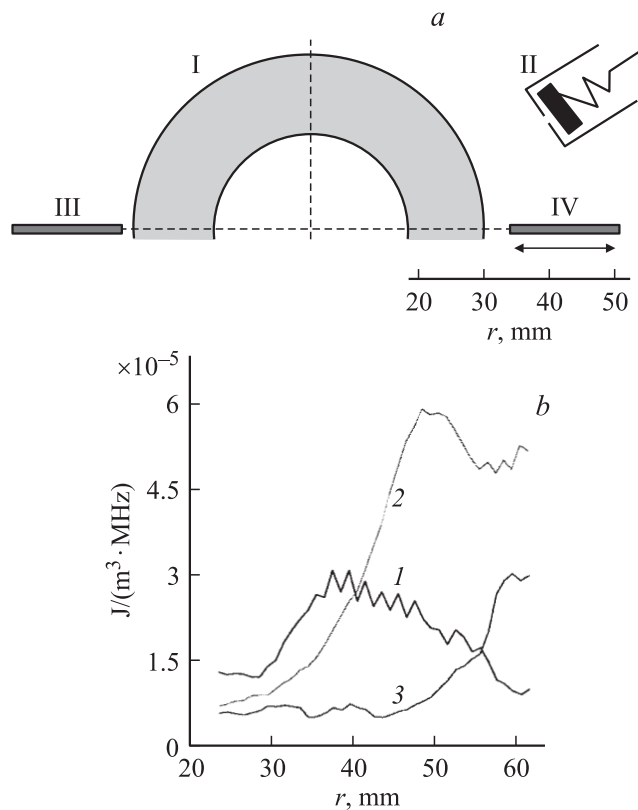


Рис. 1. Схема регистрации (*a*) и распределение интенсивности СВЧ-колебаний (*b*) в поперечном сечении плазменного потока на расстояниях от среза ускорительного канала 15 (*1*), 25 (*2*) и 55 (*3*) мм: *I* — ускорительный канал, *II* — катод-компенсатор, *III*, *IV* — СВЧ-зонды.

вкладе в возбуждение СВЧ-колебаний периферийной области выходящего из ускорительного канала плазменного потока. Как следует из представленных данных, по мере удаления от среза ускорительного канала наблюдается смещение по радиусу зоны максимальной генерации СВЧ-колебаний. При этом наибольшая интенсивность СВЧ-колебаний проявляется в областях эмиссии электронов из катода-компенсатора и захвата их в магнитное поле ускорительного канала. В проведенном

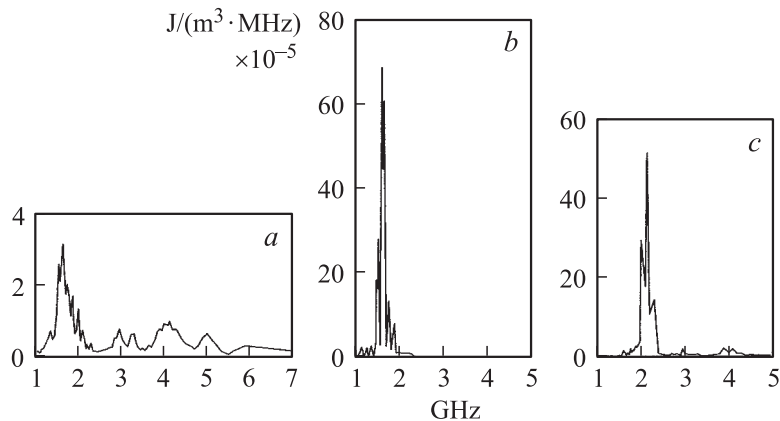


Рис. 2. Спектры СВЧ-колебаний в различных областях плазменного потока: *a* — в сечении катода-компенсатора, радиальное смещение СВЧ-зонда $r = 35$ mm, расстояние от среза ускорительного канала $z = 25$ mm; *b* — вблизи среза ускорительного канала: $r = 25$ mm, $z = 5$ mm; *c* — в ускорительном канале; $r = 29$ mm, $z = -7$ mm.

эксперименте не обнаружено существенного различия в интенсивности колебаний, регистрируемых с диаметрально расположенных СВЧ-зондов вблизи среза ускорительного канала в соответствии со схемой регистрации, представленной на рис. 1. Это позволяет рассматривать в качестве зоны генерации СВЧ-колебаний кольцевую аксиально-симметричную область на периферии выходящего плазменного потока.

Из локальных спектров полей плазменных СВЧ-волн (рис. 2) следует, что в периферийной области плазменного потока наиболее интенсивно развивается неустойчивость, обусловленная эмиссией электронов из катода-компенсатора. Характерно, что интенсивность СВЧ-колебаний в этой области более чем на порядок превышает интенсивность колебаний в ускорительном канале. Максимум в спектре СВЧ-колебаний проявляется на частотах 1.5–2.5 GHz, что соответствует концентрации электронов на периферии плазменного потока $n_e = (2.5-5) \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ (заметим, что в ускорительном канале и в центральной части потока концентрация электронов составляет $10^{11}-10^{12} \text{ cm}^{-3}$).

Обращает на себя внимание совпадение частот в максимуме спектра СВЧ-излучения (рис. 3) с частотами возбуждаемых колебаний в пери-

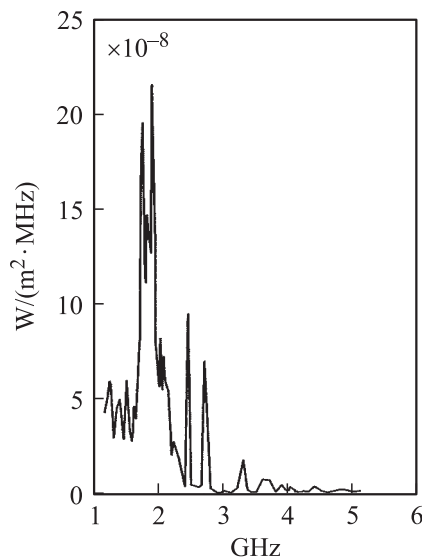


Рис. 3. Спектр электромагнитного излучения (режим формирования сфокусированного плазменного потока).

ферийной области плазменного потока, что позволяет рассматривать эту область в качестве основного источника формирования спектра электромагнитного излучения СПД. Интенсивность электромагнитного излучения из этой области плазменного потока на 3–4 порядка превышает равновесный (тепловой) уровень. На более высоких частотах, соответствующих возбуждению колебаний в центральной области плазменного потока, интенсивность СВЧ-излучения оказывается близкой к тепловому уровню.

Из представленных экспериментальных данных следует возможность представления источника электромагнитного излучения СПД в виде кольцевой структуры с азимутальным пучком электронов. Обоснованность такого представления подтверждается результатами измерений [7,8], свидетельствующими о направленности электромагнитного излучения СПД в поперечном относительно оси двигателя направлении. Такая направленность излучения характерна для излучающей электродинамической структуры [9] с кольцевым высокочастотным током на

поверхности проводящего цилиндра, образованного внутренней областью выходящего плазменного потока.

В связи с этим будем рассматривать в качестве источника СВЧ-колебаний неустойчивость плазмы с азимутальным пучком электронов в области захвата их в магнитное поле ускорительного канала. Действительно, в этой области при соотношении напряженности продольной и радиальной составляющих рассеянного магнитного поля $H_z \geq H_r$ формируются круговые траектории, эмитируемые катодом-компенсатором. Как показывают оценки, радиус вращения электронов соответствует радиусу периферийной области плазменного потока при измеренной в эксперименте [4] напряженности продольной составляющей магнитного поля. Скорость азимутального вращения электронов определяется величиной потенциала плазменного потока относительно катода-компенсатора; согласно проведенным измерениям, эта величина составляет 30–35 В, что соответствует скорости электронного пучка $v_{\perp} = (3.5-4.0) \cdot 10^6$ м/с. Тепловая скорость электронов, образующихся в зонах генерации СВЧ-колебаний, составляет $v_{Te} = (5-9) \cdot 10^5$ м/с. Концентрацию пучка быстрых электронов n_{be} можно оценить исходя из условия токовой компенсации СПД и соотношения электронных токов в зону ионизации ускорительного канала и в выходящий плазменный поток. С учетом этих факторов относительную концентрацию электронного пучка n_{be}/n_e оценим значениями $5 \cdot 10^{-2} - 10^{-1}$. Разброс скоростей электронов в пучке Δv оценим по температуре электронов в полости катода-компенсатора, применяемого в конструкции СПД, при этом $\Delta v = (0.15-0.25)v_{\perp}$.

В соответствии с результатами измерений концентрации электронов в рассматриваемой области плазменного потока и напряженности рассеянного магнитного поля рассмотрим возбуждение высокочастотной ветви собственных электронных колебаний плазмы при соотношении ленгмюровской и циклотронной частот электронов $\omega_{Le} \gg \omega_{Ce}$ (для волновых чисел возбуждаемых колебаний, соответствующих $kv_{\perp}/\omega_{Ce} \gg 1$). Зависимость частоты возбуждаемых колебаний $\omega_1(\theta)$ от угла между магнитным полем и направлением распространения плазменной волны представим в виде [10]

$$\omega_1(\theta) = \omega_{Le} + (\omega_{Ce}^2/2\omega_{Le}) \sin \theta. \quad (1)$$

Полосу частот возбуждаемых колебаний $\Delta\omega$ определим как интервал частот, в пределах которого угол между волновым вектором и направлением магнитного поля изменяется в пределах $\pi/2$. Определенная

таким образом оценка полосы частот $\Delta\omega = \omega_{Ce}^2/2\omega_{Le}$ согласуется с экспериментальными данными о ширине локальных спектров плазменных колебаний, представленных на рис. 2.

Интенсивность СВЧ-колебаний, возбуждаемых в выходящем плазменном потоке, оценим исходя из предположения о пространственном усилении начальных тепловых шумов на конвективной неустойчивости плазмы и ограничении роста интенсивности СВЧ-колебаний в продольно-неоднородной области плазменного потока. Такое представление о механизме насыщения амплитуд СВЧ-колебаний нам представляется оправданным в связи с наличием продольной составляющей скорости электронов и изменением фазовых скоростей возбуждаемых плазменных волн в продольно-неоднородном плазменном потоке. Нарастание интенсивности колебаний в таком потоке прекращается при выходе фазовых скоростей возбуждаемых плазменных волн из интервала значений, определяемого разбросом скоростей электронов в пучке. Составляющую скорости электронного пучка в направлении продольной неоднородности плазменного потока приближенно определим исходя из соотношения составляющих магнитного поля в области катода-компенсатора $v_z = (H_r/H_z)v_\perp$ (при преобладающем вкладе азимутальной составляющей скорости электронов в формирование траектории электронного пучка в зоне генерации СВЧ-колебаний).

Следуя работе [11], максимальное усиление тепловых шумов в рассматриваемой области плазменного потока в линейном режиме развития пучковой неустойчивости $\Lambda = \ln(W/W_0)$ представим в виде

$$\Lambda = (n_{be}/n_e)(v_\perp/\Delta v)(\Delta L_{pl}\omega_1(\theta)/v_z)(v_{Te}/v_\perp)^2, \quad (2)$$

здесь W_0 — плотность энергии тепловых плазменных колебаний, n_{be}/n_e — относительная концентрация пучка электронов, ΔL_{pl} — характерный размер продольной неоднородности плазменного потока, определяемый из распределения концентрации электронов [4]. Применительно к измеренным в эксперименте параметрам плазменного потока и оценкам параметров электронного пучка коэффициент усиления тепловых шумов оценим значениями $W/W_0 = 10^5 - 10^6$. Максимальная величина спектральной плотности энергии СВЧ-колебаний в области захвата электронов составляет $W = (10^6 - 10^{-5}) \text{ J}/(\text{m}^3 \cdot \text{MHz})$.

Спектральную плотность интенсивности электромагнитного излучения оценим исходя из представления о преобладающем вкладе в формирование поля излучения рассеяния плазменных волн на флуктуациях

плотности плазменного потока. Характерные значения коэффициентов преобразования плазменных волн в электромагнитные составляют 10^{-5} – 10^{-4} в зависимости от уровня низкочастотной турбулентности плазменного потока [2]. Поток энергии электромагнитного излучения при этом составляет 10^{-7} – 10^{-6} W/(m² · MHz). Оценки интенсивности полей плазменных волн и электромагнитного излучения согласуются с теми значениями, которые получены в эксперименте.

Полученные в работе экспериментальные данные и их физическая интерпретация расширяют представления о динамике электронного компонента при ускорении плазмы в устройствах типа СПД. Известно, что электроны, выходящие из катода-компенсатора, образуют два потока, один из которых уходит со струей ионов, другой захватывается в магнитное поле ускорительного канала и направляется к аноду. Захват из указанных потоков представляет диссипативный процесс, поскольку длины свободного пробега электронов существенно превышают размеры области захвата, диссипативный процесс реализуется в форме возбуждения высокочастотных колебаний. Представленные в работе результаты относятся к диссипативному захвату электронов в ускорительный канал.

Показано, что область захвата электронов в ускорительный канал определяет развитие высокочастотной неустойчивости плазменного потока и формирование поля электромагнитного излучения. Предлагается возможным описать конфигурацию источника плазменных СВЧ-колебаний в виде кольцевой аксиально-симметричной области на выходе плазменного потока из ускорительного канала. Предложенная структура источника колебаний и электромагнитного излучения СПД может быть использована для оценки помехового воздействия двигательных установок на радиоаппаратуру космических аппаратов.

Список литературы

- [1] Кирдяшев К.П., Морозов А.И. // Физика плазмы. 1999. Т. 25. № 4. С. 326–332.
- [2] Кирдяшев К.П. Высокочастотные волновые процессы в плазмодинамических системах. М.: Энергоатомиздат, 1982. С. 142.
- [3] Кирдяшев К.П. Радиотехника. 1988. № 8. С. 70–77.
- [4] Морозов А.И., Бугрова А.И., Десятков А.В. и др. // Физика плазмы. 1997. Т. 23. № 7. С. 635–645.

- [5] *Bugrova A.I., Desyatskov A.V., Kharchevnikov V.K.* et al. // Proceedings of the 3rd International Conference on Spacecraft Propulsion. Cannes, 10–13 October 2000. ESA SP-465. P. 881–884.
- [6] *Кирдяшев К.П., Бугрова А.И., Морозов А.И.* и др. // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. В. 14. С. 7–15.
- [7] *Kirdyashev K.P.* // Proceedings of the 3rd International Conference on Spacecraft Propulsion. Cannes, 10–13 October 2000. ESA SP-465. P. 653–660.
- [8] *Brukhty V.I., Kirdyashev K.P.* // The report on the 23rd International Electric Propulsion Conference. Seattle, Wa, 13–16 September 1993. IEPС-93-148.
- [9] *Уэйт Д.Р.* Электромагнитное излучение из цилиндрических систем. М.: Сов. радио, 1963. С. 239.
- [10] *Михайловский А.Б.* Теория плазменных неустойчивостей. Т. 1. Неустойчивости однородной плазмы. М.: Атомиздат, 1975. С. 272.
- [11] *Брейзман Б.Н., Рютов Д.Д.* // ЖЭТФ. 1969. Т. 57. В. 4(10). С. 1401–1410.