

04;09

СВЧ-колебания в ускорительном канале стационарного плазменного двигателя 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 1 марта 2005 г.

Представлены результаты измерений параметров СВЧ-колебаний плазмы в ускорительном канале стационарного плазменного двигателя СПД-АТОН. Установлена устойчивая связь интенсивности СВЧ-колебаний с конфигурацией магнитного поля в области ускорения плазмы и формированием оторванного от стенок канала плазменного потока. Полученные экспериментальные данные согласуются с представлением о вкладе рассеяния электронов на СВЧ-колебаниях в аномальную поперечную проводимость плазмы в ускорительном канале.

Известно, что ускорение плазмы в стационарном плазменном двигателе (СПД) сопровождается возбуждением СВЧ-колебаний, вызванных неустойчивостью электронного компонента плазмы в ускорительном канале и выходящем плазменном потоке [1]. Неравновесный характер функции распределения электронов по скоростям определяется влиянием электрического поля, ионизации рабочего вещества в процессе ускорения плазмы и взаимодействия плазменного потока со стенками ускорительного канала. Основные факторы взаимодействия плазмы с диэлектрическими стенками канала сводятся к рассеянию дрейфовых потоков электронов, аномальной эрозии и вторичной электронной эмиссии стенок. Возбуждаемые в процессе развития неустойчивости плазмы СВЧ-колебания позволяют рассматривать возможность реализации турбулентных механизмов перемешивания различных групп электронов в зоне ускорения и создания условий для аномальной подвижности электронов поперек внешнего магнитного поля.

В традиционных конструкциях СПД существенно взаимодействие плазменного потока со стенками канала, при котором рассеяние электронов на стенках обеспечивает аномальную поперечную проводимость плазмы в зоне ускорения и формирование разрядного тока. Реализующийся при этом механизм пристеночной проводимости плазмы впервые обоснован и экспериментально исследован в [2]. Особые условия для проявления аномальной поперечной проводимости плазмы в ускорительном канале имеют место в плазменных двигателях СПД второго поколения. В этих двигателях при предложенной в [3] конфигурации магнитного поля в канале формируются оторванные от стенок плазменные потоки с малым углом расходимости и предельными параметрами двигательной установки с максимальным коэффициентом полезного действия.

Естественно предположить, что при этом одним из факторов, приводящих к аномальной поперечной проводимости плазмы, является рассеяние электронов на возбуждаемых в канале СВЧ-колебаниях. Для экспериментальной проверки возможности проявления рассматриваемого механизма поперечной проводимости плазмы в данной работе исследовано возбуждение СВЧ-колебаний в ускорительном канале при различной конфигурации магнитного поля в зоне ускорения. Влияние магнитного поля на режим ускорения плазмы сводилось к формированию плазменных потоков с различной степенью их взаимодействия со стенками ускорительного канала.

Эксперименты проводились на модели двигательной установки СПД-АТОН с внешним диаметром канала 60 мм, описанной в [4]. В качестве рабочего вещества использовался ксенон с массовым расходом через газовый распределитель в буферной области 2 mg/s при расходе газа в полость катода-компенсатора 0.4 mg/s. Изменение конфигурации магнитного поля в канале и управление формой выходящего плазменного потока производилось путем изменения тока в катушках магнитной системы. При ориентации силовых линий по радиусу вблизи среза ускорительного канала проявлялось фокусирующее действие магнитного поля и оторванный от стенок плазменный поток характеризовался близкой к цилиндрической геометрией. В режимах с наклонными к оси двигателя магнитными силовыми линиями выходящий плазменный поток имел конусообразную форму со значительным углом расходимости, в этих режимах заметно снижалась тяговая эффективность двигательной установки.

В исследованных режимах при различной конфигурации магнитного поля в канале разрядный ток поддерживался постоянным (около 2.05 А) при номинальном напряжении 300 В. Отметим, что эта величина разрядного тока, как и во всех плазменных системах типа СПД, существенно превосходила значения, рассчитанные по частоте парных столкновений электронов в зоне ускорения.

Для регистрации полей плазменных СВЧ-волн использовались двухпроводные СВЧ-зонды с индуктивной связью в цепи измерительного устройства. Один из зондов вводился в ускорительный канал через щель диэлектрической стенки СПД на расстоянии 20 мм от анода, другой — перемещался в продольном и поперечном сечении выходящего плазменного потока. Применение СВЧ-зондов, находящихся под плавающим потенциалом, обеспечивало их необходимую развязку по постоянному напряжению в областях плазмы с распределенным электрическим полем разряда. Обычно СВЧ-зонды применяются при проведении относительных измерений и регистрации распределения СВЧ-полей в объеме плазменного образования. Трудности получения данных абсолютных измерений и получения спектральных характеристик СВЧ-колебаний вызваны неопределенностью связи СВЧ-зонда с полями плазменных волн, влиянием плазмы на приемные свойства зонда и резонансными свойствами измерительного тракта. В связи с этим в работе проведены калибровочные измерения в исследованном диапазоне частот по интенсивности тепловых плазменных колебаний в стандартном газоразрядном генераторе шума по методике, описанной ранее в [5].

Спектр исследуемых полей плазменных колебаний в ускорительном канале перекрывался измерительными устройствами с перестройкой частоты в диапазонах 1.05–2.15, 1.95–4.0 и 3.85–7.15 GHz. Регистрация спектров СВЧ-колебаний производилась в стационарном режиме плазменной установки с использованием метода последовательных измерений в трех каналах с согласованием результатов в перекрывающихся участках спектра. Метод последовательного спектрального анализа осуществлялся при перестройке частоты измерительных устройств со скоростью 10–15 MHz/s, что обеспечивало регистрацию отдельных спектральных составляющих в полосе частот 1–10 MHz. Определение особенностей огибающей СВЧ-колебаний в канале и выходящем плазменном потоке производилось с различным временным разрешением. При проведении спектральных измерений и регистрации

распределения полей вблизи стенки ускорительного канала временно разрешение составляло 0.1–1.0 с. В режимах измерений на отдельных частотах для оценки частотной и пространственной корреляции в выбросах нестационарной составляющей СВЧ-колебаний эта величина составляла 100–200 μ s.

Для установления связи данных локальных СВЧ-измерений с параметрами создаваемого в ускорительном канале плазменного потока использованы радиальные распределения концентрации n_e , температуры электронов T_e и потенциала плазмы ΔU_r , которые были получены при измерениях в [4] с помощью подвижных ленгмюровских зондов. Эти данные позволили оценить тепловой уровень СВЧ-колебаний на различных частотах и выделить области частот, соответствующих возбуждению колебаний в результате развития в ускорительном канале неустойчивости электронного компонента плазменного потока.

Результаты проведенных измерений свидетельствуют о возбуждении в канале СВЧ-колебаний в диапазоне частот до 6.5 GHz, интенсивность которых в отдельных областях спектра на 2–3 порядка превышает тепловой уровень (рис. 1). Максимум спектра СВЧ-колебаний проявляется в диапазоне частот 1–2.5 GHz, соответствующем значениям ω_{pe} в периферийной области плазменного потока (ω_{pe} — ленгмюровская частота электронов). Обращает на себя внимание „изрезанность“ наблюдаемых широкополосных спектров плазменных колебаний с выделением в них квазимонохроматических составляющих. Структура спектров воспроизводится при повторных измерениях для фиксированных режимов разряда, что позволяет связать формирование спектров СВЧ-колебаний с процессами в ускорительном канале СПД. Разнос по частоте спектральных составляющих в диапазоне частот 1–2 GHz составляет 400–450 MHz и соответствует значениям циклотронных частот электронов в зоне ускорительного канала с индукцией магнитного поля 0.014–0.016 Т. Отметим, что наблюдаемые при общем спаде интенсивности изменения в спектре СВЧ-колебаний обусловлены несколькими причинами: отмеченными дискретными составляющими на гармониках циклотронной частоты электронов, неполным согласованием с плазмой применяемых СВЧ-зондов и возможными погрешностями метода их калибровки по эталонному источнику плазменных СВЧ-колебаний.

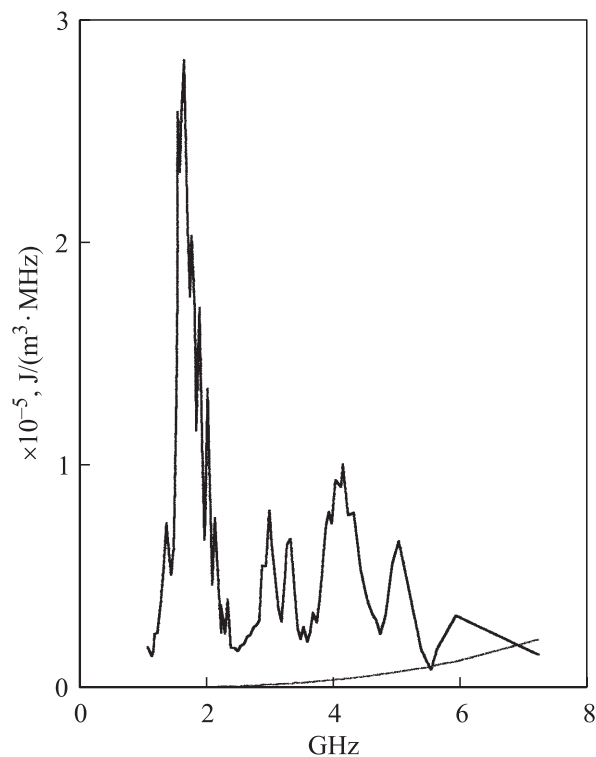


Рис. 1. Сопоставление спектра плазменных СВЧ-колебаний в пристеночной области ускорительного канала (верхняя кривая) со спектром тепловых шумов (нижняя кривая): расположение СВЧ-зонда — 1 mm от внешней диэлектрической стенки канала; режим фокусирующего магнитного поля.

Различия в режимах формирования плазменного потока по конфигурации магнитного поля в зоне ускорения проявляются в распределении СВЧ-поля по сечению канала (рис. 2). Для оторванного от стенок канала плазменного потока наблюдается резкий рост интенсивности колебаний при перемещении СВЧ-зонда к центру кольцевой области канала. Незначительное изменение интенсивности колебаний по радиусу потока характерно для условий формирования конусообразного плазменного потока, взаимодействующего со стенками канала. Характерно,

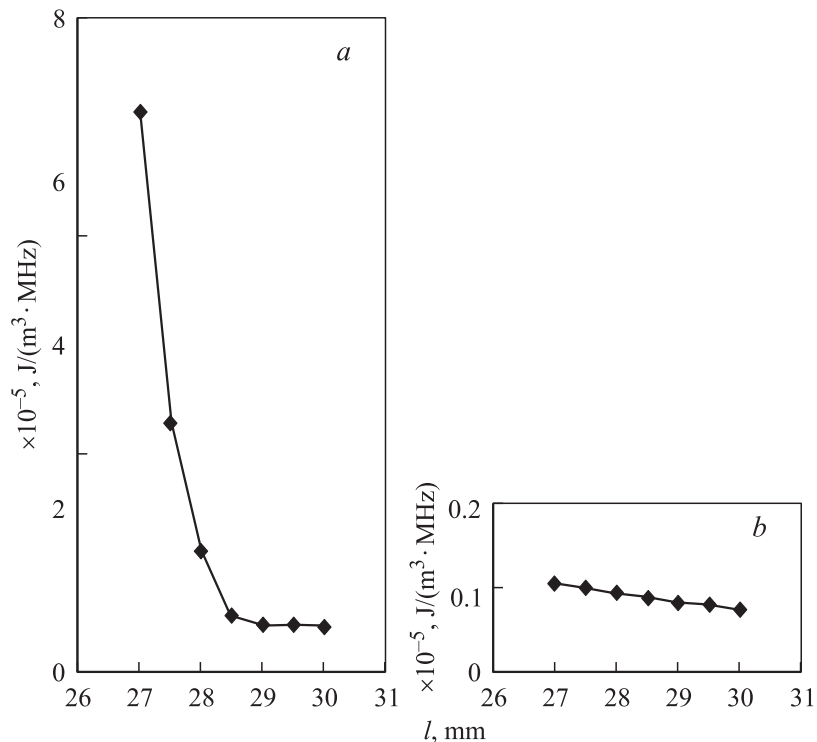


Рис. 2. Радиальное распределение интенсивности СВЧ-колебаний вблизи стенки ускорительного канала для фокусирующей (*a*) и традиционной (*b*) геометрии магнитного поля (внешний радиус канала 30 mm).

что при переходе к режиму формирования оторванного от стенок плазменного потока интенсивность колебаний возрастает в 25–50 раз по сравнению с режимом СПД с традиционной конфигурацией магнитного поля.

При определении интенсивности СВЧ-полей в ускорительном канале и выходящем плазменном потоке следует исходить из нестационарности огибающей колебаний (рис. 3), при которой наблюдается значительное (до 20 dB) снижение интенсивности выбросов при выходе плазменного потока из ускорительного канала. При этом проявляется

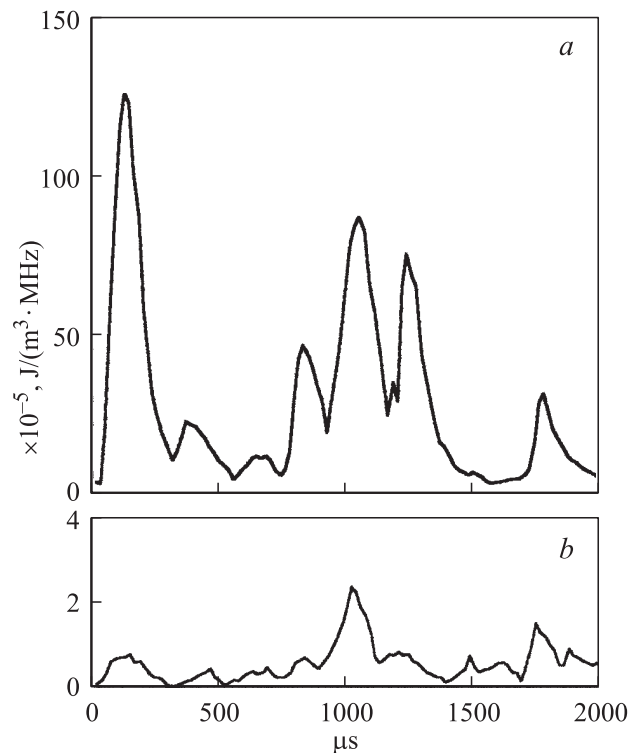


Рис. 3. Осциллограммы огибающей СВЧ-колебаний вблизи стенки ускорительного канала (*a*) и в выходящем плазменном потоке (*b*): положение СВЧ-зонда — 29 mm от оси двигателя.

случайный характер огибающей СВЧ-колебаний и коэффициент корреляции выбросов интенсивности колебаний в канале и выходящем плазменном потоке не превышает 0.5. Из-за импульсного характера огибающей СВЧ-колебаний следует учитывать сглаживающее действие регистрирующей аппаратуры на результаты измерений, представленных на рис. 1, 2. С учетом этого эффекта плотность энергии нестационарной составляющей колебаний в диапазоне частот 1–3 GHz достигает $10^{-3} - 10^{-2} \text{ J}/(\text{m}^3 \cdot \text{MHz})$. Эта величина на 4–5 порядков превосходит тепловой уровень колебаний электрического поля в плазме.

Результаты экспериментов позволяют сделать два вывода, существенных для понимания процессов в ускорительном канале плазменного двигателя СПД-АТОН. Прежде всего, плазма в ускорительном канале является сильно неравновесной и характеризуется развитием пучковой неустойчивости, связанной с ускорением электронов в периферийной области плазменного потока. На возможность реализации неустойчивости плазмы в радиальном электрическом поле указывают результаты измерений потенциала плазмы в канале [4]. Согласно проведенным измерениям, при формировании оторванного от стенок плазменного потока перепад потенциалов в этой области составляет 35–40 V на расстоянии 0.2–0.3 mm. При этом напряженность радиальной составляющей электрического поля вблизи стенки канала достигает значений 10^2 – 10^3 V/cm, что существенно превосходит критическое поле [6] $E_D \approx 4\pi e^4 (n_e/T_e)$, при превышении которого происходит ускорение электронов в периферийной области плазменного потока. В результате формирования радиальных электронных пучков в ускорительном канале возбуждаются электронные ленгмюровские колебания, что подтверждается результатами измерений (рис. 1).

Второй вывод из проведенных экспериментов связан с оценкой вклада в поперечную проводимость плазмы рассеяния электронов на возбуждаемых в канале СВЧ-колебаниях. Возможность проявления такого эффекта основывается на том, что в наибольшей степени возбуждение СВЧ-колебаний наблюдается при конфигурации магнитного поля в канале, приводящей к формированию оторванного от стенок канала плазменного потока. Необходимые оценки эффективности турбулентного механизма рассеяния электронов в канале и формирования поперечной проводимости плазмы можно получить, исходя из модели ускоряющего холловского слоя плазмы [7]. В связи с этим представим соотношение для эффективной частоты рассеяния электронов на колебаниях в виде:

$$v_{ef} = (2W_{pe}/n_e \varepsilon_{er})^{1/2} \omega_{pe}, \quad (1)$$

в котором W_{pe} — плотность энергии электронных ленгмюровских колебаний, $\varepsilon_{er} = e\Delta U_r$ — энергия быстрых электронов, определяемая по перепаду потенциала плазмы в пристеночной области канала. По результатам измерений интенсивности СВЧ-поля плотность энергии колебаний оценивается значениями $W_{pe} = 3 \cdot 10^{-3}$ – 10^{-2} J/m³ в полосе частот $\Delta f = 1$ GHz. При этом эффективная частота рассеяния электро-

нов на колебаниях в соответствии с (1) составляет $(1-2) \cdot 10^9 \text{ s}^{-1}$. Величина разрядного тока j_D , сформированного в зоне ускорения плазмы, определяется поперечной подвижностью электронов в канале $b_{e\perp}$ [8]:

$$j_D = en_e b_{e\perp} E_z S_C, \quad (2)$$

$$b_{e\perp} = (e/m_e)v_{ef}/(\omega_{Be}^2 + v_{ef}^2),$$

E_z — напряженность продольной составляющей электрического поля в зоне ускорения, ω_{Be} — циклотронная частота электронов, S_C — площадь поперечного сечения токовой области канала. Из соотношений (2) следует, что в экспериментальных режимах установки СПД-АТОН с величиной разрядного тока $j_D = 2.05 \text{ A}$ для обеспечения поперечной проводимости плазмы необходимые значения $v_{ef} = (1-5) \cdot 10^8 \text{ s}^{-1}$ при частотах парных столкновений электронов 10^5-10^6 s^{-1} . Таким образом, результаты проведенных экспериментов позволяют связать формирование оторванных от стенок ускорительного канала СПД плазменных потоков и аномальной поперечной проводимости плазмы с возбуждением в канале СВЧ-колебаний.

Список литературы

- [1] Кирдяшев К.П., Морозов А.И. // Физика плазмы. 1999. Т. 25. № 4. С. 326–332.
- [2] Бугрова А.И., Морозов А.И., Харчевников В.К. // Физика плазмы. 1990. Т. 16. № 2. С. 1469–1481.
- [3] Морозов А.И., Бугрова А.И., Десятсков А.В. и др. // Физика плазмы. 1997. Т. 23. № 7. С. 635–645.
- [4] 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-2000. P. 881–884.
- [5] Кирдяшев К.П. Высокочастотные волновые процессы в плазмодинамических системах. М.: Энергоатомиздат, 1982. С. 142.
- [6] Drieger H. // Phys. Rev. V. 117. N 2. P. 329–338.
- [7] Арефьев В.И., Кирдяшев К.П. // ЖТФ. 1975. Т. 45. В. 3. С. 527–535.
- [8] Физика и применение плазменных ускорителей / Под ред. А.И. Морозова. Минск: Наука и техника, 1974. С. 400.