

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ КОЛЕБАНИЙ В РАЗРЯДНОМ КАНАЛЕ ХОЛЛОВСКОГО ДВИГАТЕЛЯ В ДВУХ УСТОЙЧИВЫХ РЕЖИМАХ ГОРЕНИЯ РАЗРЯДА

© 2020 г. И. А. Хмелевской^{a, b, *}, Д. А. Томилин^a

^a Исследовательский центр им. М.В. Келдыша, Москва, Россия

^b Московский физико-технический институт (государственный университет), Долгопрудный, Россия

*e-mail: khmelevskoi@kerc.msk.ru

Поступила в редакцию 23.09.2019 г.

После доработки 09.12.2019 г.

Принята к публикации 19.12.2019 г.

Экспериментально исследована структура высокочастотных колебаний в плазме холловского двигателя в двух различных устойчивых режимах горения разряда: “спице” и “колоколе”. Исследуемые режимы горения отличаются геометрической формой плазменной струи разряда, а также по основным интегральным характеристикам двигателя: значениям анодного КПД, тяги, удельного импульса и тепловому режиму конструкции при практически идентичных входных параметрах. Исследование проводилось, в основном, в диапазоне частот 5–150 МГц. Показано, что осцилляции в этом диапазоне частот представляют собой набор гармоник азимутальных волн, которые распространяются в направлении, совпадающем с направлением дрейфа электронов, с законом дисперсии, близким к линейному. Отмечена явная корреляция между спектральным составом волн и режимом горения разряда.

Ключевые слова: холловский двигатель, режимы горения разряда, аномальный транспорт электронов, проводимость электронов

DOI: 10.31857/S0367292120050054

1. ВВЕДЕНИЕ

Двигатели холловского типа успешно эксплуатируются в составе космических аппаратов более 40 лет. Холловский двигатель (ХД) представляет собой плазменное устройство, в коаксиальном канале которого создается осевое электрическое поле и радиальное магнитное поле, причем электроны в плазме ХД являются замагниченными, а ионы – нет. Физические основы ХД были заложены А.И. Морозовым и А.В. Жариновым и изложены в работах [1–6].

Опыт разработки и испытаний ХД в ГНЦ “Центр Келдыша” показывает, что в небольшом интервале входных параметров работы двигателя (расход газа, напряжение разряда, геометрия магнитной системы и разрядной камеры) может существовать несколько режимов горения разряда, существенно отличающихся друг от друга по выходным и удельным характеристикам (тяги, удельный импульс тяги, КПД, тепловое состояние конструкции). В частности, в работе [7] проведено подробное параметрическое сравнительное исследование двух режимов горения, условно

названных режим “спица” (оптимальный) и режим “колокол” (неоптимальный). В режиме “спица” можно отметить ярко выраженную плазменную спицу, располагающуюся на оси двигателя; в режиме “колокол” форма струи напоминает трубу или колокол. Показано, что для ХД со средним диаметром 77 мм перестроения происходят при относительно высоком напряжении разряда (более 500 В) и умеренной мощности (до 2.5 кВт). При перестроении из режима “спица” в режим “колокол” ток разряда скачком возрастает на 10–30% с одновременным относительным падением тяги на 5–15% и КПД – на 20–40%. Эффективность использования электронного тока (отношение тока ионов к току разряда) в режиме “спица” более чем на 10% выше. Аналогичные перестроения режимов горения разряда наблюдались и в ряде других работ [8–15], что говорит о том, что подобные скачкообразные перестроения не связаны с индивидуальными конструктивными особенностями конкретного двигателя, хотя количественные характеристики перестроений, по всей видимости, зависят как от конкретной конструкции двигателя, так и от внешних пара-

метров разряда, в частности, от расхода газа и от напряжения разряда. Так, например, в [14] проводились параметрические испытания в диапазоне напряжений разряда 200–400 В и расхода газа 2–3 мг/с на двигателе типа АТОН, и авторы отмечают наличие скачкообразного перестроения режима горения разряда при изменении величины магнитного поля в разрядном канале, при котором изменялся КПД двигателя. Похожее перестроения довольно подробно изучались в работе [15] на лабораторной модели ускорителя при напряжении разряда 200 В; в частности, авторами выделен режим горения разряда с “магнитным насыщением”, похожий по некоторым признакам на режим “колокол”, упомянутый выше. Однако в [14, 15] перестроения регистрировались при параметрах разряда с достаточно низким напряжением разряда (200–400 В), а степень влияния на выходные характеристики не отражена, в то время как в работе [7] никаких скачкообразных перестроений при напряжении меньше 500 В не наблюдалось в широком диапазоне изменений по расходу газа и магнитному полю, а перестроения после 500 В приводили существенной деградации всех параметров двигателя. Данный феномен существенно затрудняет прогнозирование длительной работы относительно высоковольтных ХД при эксплуатации в составе КА, а исследования причин и критериев перестроения между режимами является важной и актуальной задачей.

В [7] было показано, что перестроения из режима “спица” в режим “колокол” происходят либо при увеличении значения магнитного поля в канале до определенной критической величины, либо при снижении расхода газа ниже некоторого минимума, при сохранении остальных параметров постоянными. При этом также было отмечено, что при перестроении между режимами наибольшему изменению подвергается составляющая электронного тока в токе разряда, что и приводит к существенному изменению КПД. Поскольку с величинами магнитного поля и плотности плазмы (которая, в свою очередь, зависит от расхода газа) в разрядном канале тесно связана проводимость электронов, то поиск причин и критериев наблюдаемых перестроений имеет смысл осуществлять в контексте их связи с электронной проводимостью.

Известно, что классические типы проводимости, основанные на столкновениях электронов с тяжелыми частицами (атомами и ионами рабочего тела) или стенками разрядного канала, не в полной мере описывают наблюдаемую величину электронного тока в разрядном канале ХД [16], в процессе переноса электронов от катода к аноду участвуют также колебания и волны в плазме [17]. Кроме того, скачкообразный характер перестроения может свидетельствовать о развитии или усилении какого-то типа неустойчивости. В плазме

ХД наблюдаются колебания и волны в диапазоне частот от нескольких кГц до нескольких ГГц [18]. Среди всех типов наблюдаемых возмущений можно отметить высокочастотные волны меггерцового диапазона, связанные с дрейфовым движением электронов. Их свойства довольно подробно исследовались теоретически и экспериментально в работах [15, 17, 19–28]. Одним из наиболее интересных свойств данных возмущений является то, что волны имеют фазовую скорость, близкую к скорости невозмущенного дрейфа электронов, и азимутальную компоненту электрического поля. Это дает свободу для осцилляционных дрейфовых движений электронов вдоль оси двигателя, что, в свою очередь, может влиять на процесс проводимости электронов в разрядном канале ХД.

Данная работа посвящена сравнительному экспериментальному исследованию структуры высокочастотных (ВЧ) возмущений плазмы в разрядном канале холлового двигателя в двух режимах горения разряда: “спица” и “колоколе”.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И ОБОРУДОВАНИЕ

Испытания проводились в вакуумной камере КВУ-90 в ГНЦ “Центр Келдыша”. Камера представляет собой цилиндр диаметром 3.8 м и длиной 8 м. В процессе испытаний давление в камере было не выше 5.5×10^{-3} Па и поддерживалось с помощью криогенной системы откачки. Контроль работы двигателя и его параметров осуществлялся автоматизированной системой управления и сбора данных, которые включали в себя токи, потенциалы, расход газа. В качестве рабочего тела использовался ксенон.

Эксперимент проводился на лабораторной модели холлового двигателя со средним диаметром разрядного канала 88 мм. Двигатель был оснащен ленгмюровскими зондами, смонтированными во внешний керамический изолятор на расстоянии 1–2 мм друг от друга в аксиальном направлении и расположенными на различных углах в азимутальном направлении. Схема двигателя представлена на рис. 1. Положения зондов в аксиальном и азимутальном направлениях указаны в табл. 1 (ось 0° по азимуту выбрана в направлении зонда № 1).

Колебания плавающего потенциала плазмы измерялись при помощи электрической схемы, изображенной на рис. 2 [29, 30]. Колебания плавающего потенциала отличаются от колебаний потенциала плазмы по амплитуде на величину, соответствующую сопротивлению пограничного слоя. Таким образом, при измерении колебаний плавающего потенциала плазмы основные фазовые соотношения остаются неизменными. Ем-

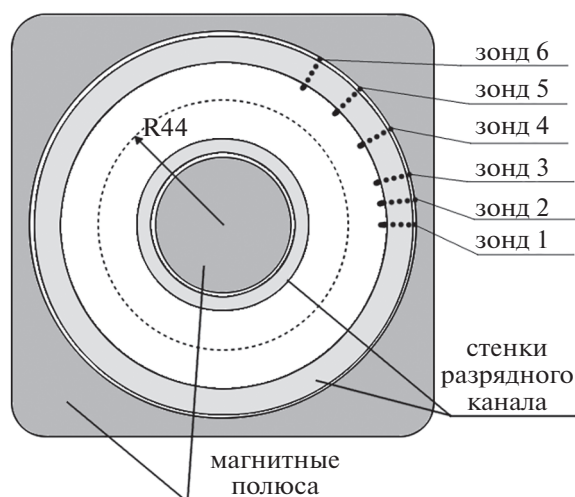


Рис. 1. Схематическое изображение двигателя с вмонтированными в наружный изолятор зондами.

кости конденсаторов и резисторов были выбраны: $C1 = 1000$ пФ, $C2 = 330$ пФ, $R1 = R2 = 2$ кОм. Конденсатор $C1$ позволяет измерять только переменную часть плавающего потенциала плазмы, а конденсатор $C2$ и резисторы $R1$ и $R2$ образуют П-образный фильтр верхних частот. Для регистрации измерений использовался цифровой запоминающий осциллограф.

Перестроение двигателя между режимами инициировалось изменением магнитного поля при постоянном значении напряжения разряда и расхода газа. Разрядное напряжение изменялось от 400 до 600 В с шагом в 100 В. В процессе измерения ХД работал устойчиво в одном из двух режимов горения разряда. Основные параметры работы ХД (напряжение разряда, ток разряда, расход газа) в эксперименте отражены в табл. 2. Отметим, что при напряжении разряда ниже 400 В двигатель работал только в режиме “спица”.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ ВЧ-СИГНАЛОВ

На рис. 3 приведены примеры сигналов при напряжении разряда 400 В для зонда № 6 (зонд, который расположен ближе всех к срезу двигателя) в “спице” (рис. 3а) и “колоколе” (рис. 3б). Отметим, что амплитуды сигналов при перестроении между режимами отличаются существенно. Спектры преобразования Фурье колебаний плавающего потенциала плазмы для зонда № 6 для режимов горения разряда “спица” и “колокол” показаны на рис. 4 для напряжений разряда 400 В (а), 500 В (б) и 600 В (в). Спектры во всех режимах работы представляют собой набор эквидистантных резонансов с разницей по частоте около 9–11 МГц. Отметим, что при постоянном напряже-

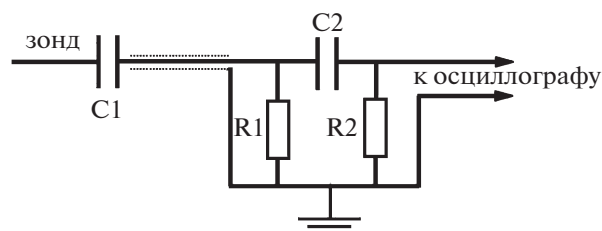


Рис. 2. Электрическая схема измерения сигнала с зонда Ленгмюра.

нии разряда и расходе газа амплитуда колебаний в режиме “колокол” в диапазоне 30–150 МГц существенно превышает амплитуду колебаний в режиме “спица”.

Для более детального анализа полученных данных использовался вейвлет-анализ сигналов с материнской функцией “Морлет” [25, 28], и были вычислены функции кросс-корреляции сигналов для различных зондов в зависимости от частоты (спектральная плотность фазовых задержек между зондами).

Спектральная плотность фазовых задержек в режиме “спица” представлена на рис. 5 и в режиме “колокол” на рис. 6. Ось абсцисс соответствует задержке между сигналами, ось ординат – частотам. Темные и светлые полосы на графиках означают соответственно максимумы и минимумы плотности фазовых задержек. Расстояние между максимумами соответствует периоду исследуемых колебаний. Первый максимум фазовых задержек между зондами определялся как задержка сигнала во времени при его распространении от одного зонда к другому для определенной частоты. Корректность определения задержки между зондами обеспечивалась наличием нескольких зондов, расположенных на различных положениях по азимуту двигателя. Так как первые максимумы фазовых задержек между зондами № 4 и № 5 для исследуемого диапазона частот приблизительно одинаковы и расположены в районе 4–6 нс независимо от частоты, то исследуемые колебания являются волнами с законом дисперсии, близким к линейному. Расстояние между зондами № 4 и № 6 в 2 раза превышает расстояние между зондами № 4 и № 5, при этом максимум фазовых задержек смещается с 4–6 нс между зон-

Таблица 1. Расположение зондов Ленгмюра в наружном изоляторе двигателя

№ зонда	1	2	3	4	5	6
Расстояние от среза ХД, мм	–9	–8	–7	–5	–3	–1
Азимутальный угол	0.0°	7.5°	15.0°	30.0°	45.0°	60.0°

Таблица 2. Основные параметры работы ХД

Напряжение разряда, В	Режим горения разряда	Ток разряда, А	Расход газа, мг/с
400	“спица”	1.90	2.10
	“колокол”	2.01	2.10
500	“спица”	2.17	2.20
	“колокол”	2.25	2.20
600	“спица”	2.26	2.32
	“колокол”	2.40	2.32

дами № 4 и № 5 до 10–14 нс между зондами № 4 и № 6, т.е. приблизительно в два раза в сторону увеличения задержки пропорционально расстоянию между зондами. Это означает, что скорость распространения от зонда к зонду приблизительно постоянна. Оценка скоростей распространения наблюдаемых волн в азимутальном направлении дает значение $(2-3) \times 10^6$ м/с. Таким образом, в режимах “спица” и “колокол” наблюдаются волны с азимутальной компонентой скорости и с законом дисперсии, близким к линейному.

Из характерного значения фазовой скорости волн и частот можно оценить характерные значения длин волн в азимутальном направлении: от ~20 до ~300 мм. Отметим, что направление распространения волн совпадает с направлением невозмущенного дрейфа электронов. Для продолжительного существования длина волн в азимутальном направлении ХД должна принимать дискретные значения, которые определяются в соответствии с формулой $\lambda = 2\pi r/m$, где m – номер моды, r – радиус, на котором расположены ленгмюровские зонды. Эквидистантные резонансы на графиках фурье-спектров сигналов (рис. 4) соответствуют азимутальным гармоникам волн с последовательным изменением номера моды, начиная с $m = 1$ (10 МГц) и до $m = 15$ (146 МГц).

В эксперименте наблюдаются 15 азимутальных гармоник волн от 10 до 146 МГц, причем амплитуда гармоник в режиме “колокол” в 2–10 раз выше, чем в режиме “спица”. Длины волн находятся в диапазоне от 320 мм (при $m = 1$) до 21 мм

(при $m = 15$). Отметим, что длина волны азимутальных гармоник много больше характерного масштаба радиуса Лармора электронов и частота волн много меньше циклотронной частоты электронов, что свидетельствует о том, что электроны в волне совершают дрейфовые осцилляционные движения.

4. АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Согласно теоретическим исследованиям [17, 22, 23] при наличии градиентов магнитного поля и концентрации плазмы в разряде холловского двигателя могут распространяться волны с азимутальной компонентой электрического поля. Наблюдаемые волны находятся в диапазоне частот от 5 до 150 МГц, распространяются со скоростью порядка 10^6 м/с в азимутальном направлении, причем направление скорости волн совпадает с направлением дрейфа электронов. Длины волн в азимутальном направлении дискретны и приблизительно соответствуют условию $\lambda = 2\pi \cdot r/m$. Закон дисперсии наблюдаемых волн близок к линейному. Колебания с похожими свойствами исследовались ранее в работе [15] и были интерпретированы как проявления дрейфовой волны. Таким образом, можно предположить, что обнаруженные волны относятся к градиентно-дрейфовым неустойчивостям.

ВЧ-волны, и в частности, градиентно-дрейфовые неустойчивости, часто связывают с аномальным током электронов. Согласно [17], величина бесстолкновительного потока электронов, свя-

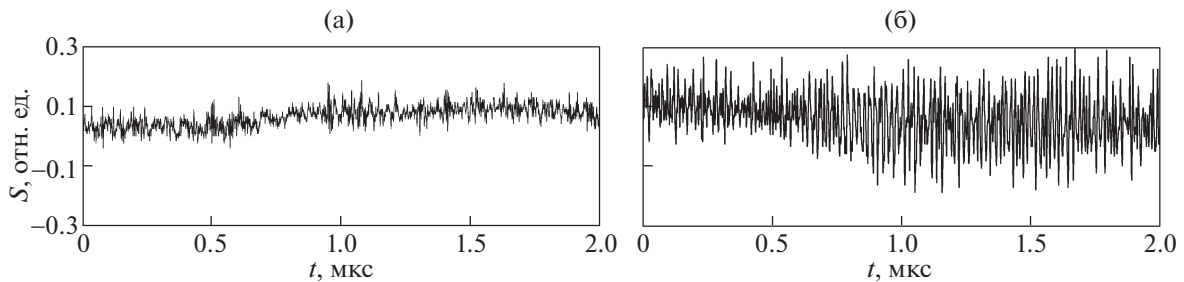


Рис. 3. Пример сигналов с зонда № 6 при напряжении разряда 400 В в режимах “спица” (а) и “колокол” (б).

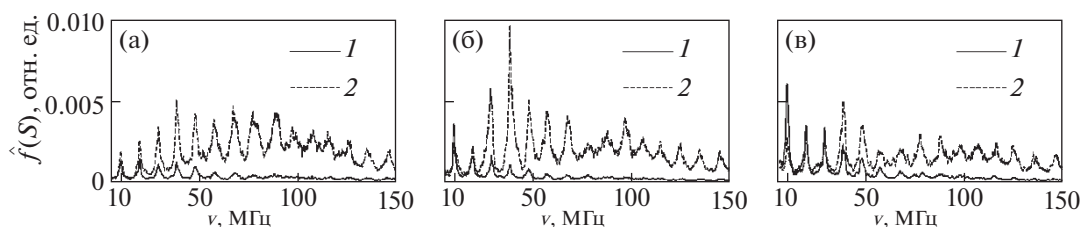


Рис. 4. Фурье-спектры сигналов при напряжении разряда: а) – 400 В, б) – 500 В, в) – 600 В. 1 – режим “спица”, 2 – режим “колокол”.

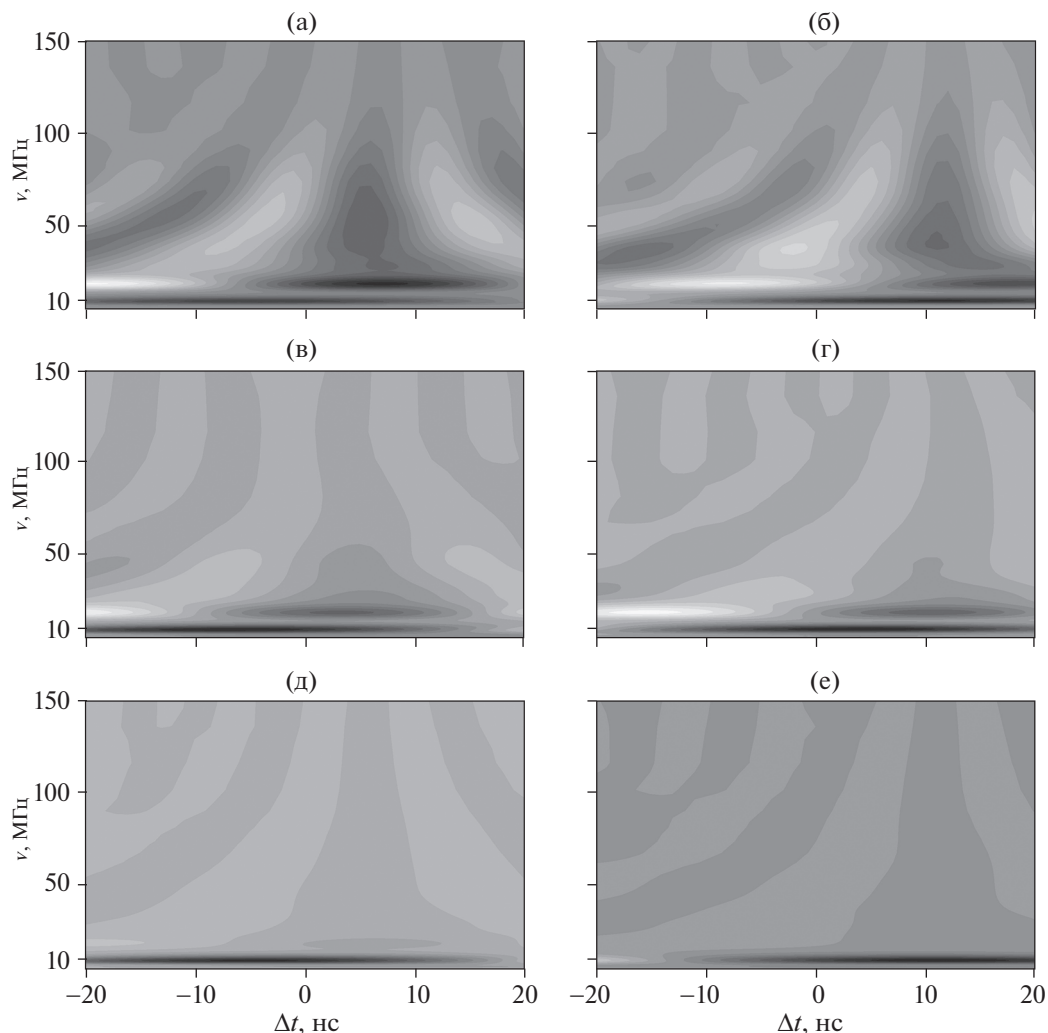


Рис. 5. Спектральная плотность фазовых задержек между зондами № 4 и № 5 (а, в, д) и между зондами № 4 и № 6 (б, г, е) для напряжений разряда 400 В (а и б), 500 В (в и г), 600 В (д и е). Режим “спица”.

занного с взаимодействием электронов и градиентно-дрейфовых волн, пропорциональна интенсивности осцилляций азимутальной компоненты электрического поля: $I = \sum_k k^2 \phi_\omega \tilde{\phi}_\omega$, где ϕ_ω – фурье-спектр колебаний электрического потенциала плазмы. Так как закон дисперсии волн

близок к линейному, то интенсивность волн можно представить в виде $I \sim \sum_k \omega^2 \phi_\omega \tilde{\phi}_\omega$, т.е. в выражении для интенсивности перейти от пространственной зависимости к временной, что позволяет оценить и сравнить значение интенсивностей колебаний азимутальной компоненты

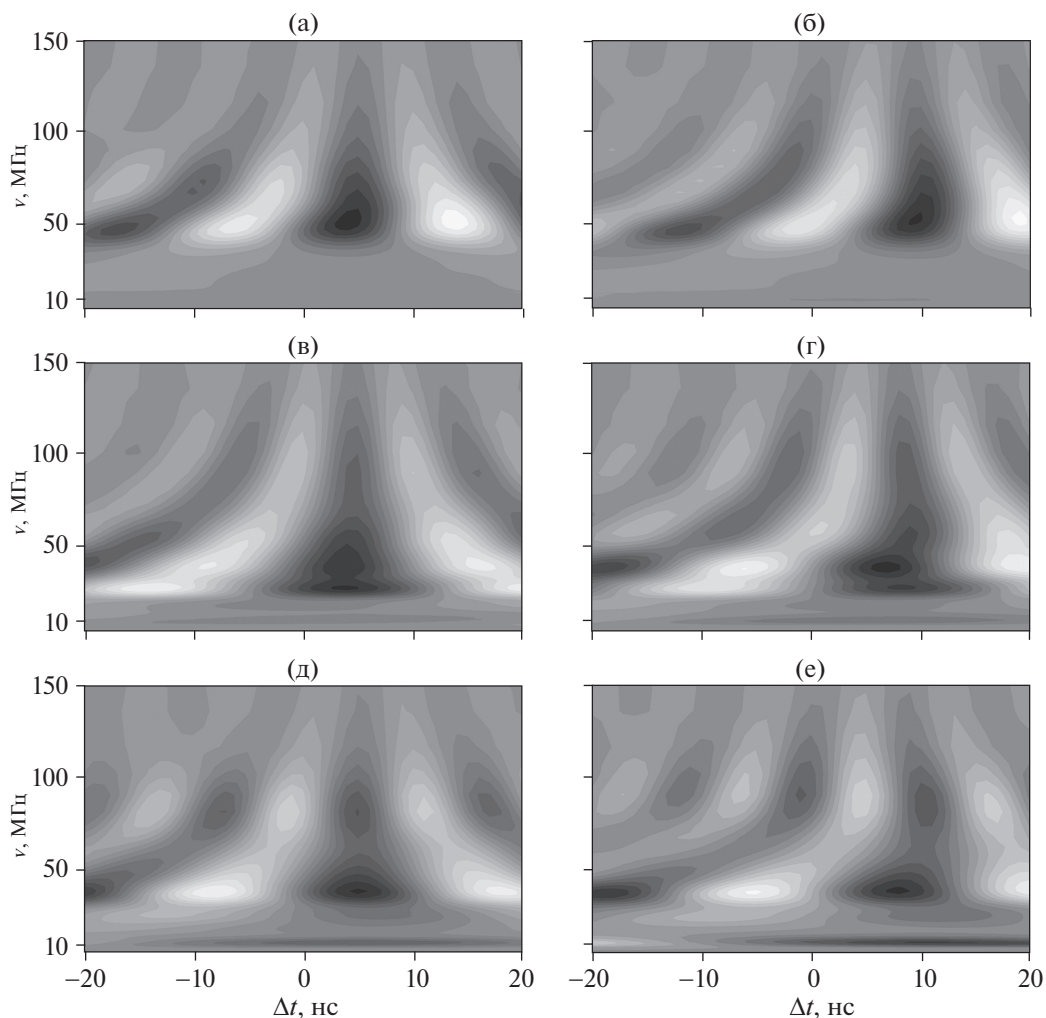


Рис. 6. То же, что на рис. 5, в режиме “колокол”.

электрического поля для двух режимов горения разряда из экспериментальных данных. Поскольку в эксперименте измерялся плавающий потенциал зондов, а не непосредственно потенциал плазмы, то оценку будем проводить на основе данных о плавающем потенциале, при этом анализ полученных результатов будем проводить с учетом этого факта исключительно в качественном ключе.

Оценка интенсивности исследуемых волн в режимах горения разряда “спица” и “колокол” представлена соответственно на рис. 7а и 7б (0 мм по оси абсцисс соответствует срезу двигателя). Видно, что интенсивность у среза двигателя существенно выше по сравнению с ее значениями внутри разрядного промежутка во всех режимах работы. Отметим, что в режиме “спица” интенсивность с увеличением напряжения разряда увеличивается, а в режиме “колокол” падает. Для всех напряжений разряда интенсивность у среза

двигателя в режиме “колокол” в 10–60 раз выше по сравнению с режимом “спица”.

Таким образом, в режиме горения разряда с повышенным значением тока разряда интенсивность азимутальных волн существенно выше, что косвенно подтверждает связь амплитуды градиентно-дрейфовых волн и аномального транспорта электронов. Однако отсутствие информации о градиенте концентрации плазмы в измеряемой области не позволяет количественно оценить различие аномального потока электронов поперек магнитного поля в двух различных режимах. В результате данного исследования можно заключить, что при перестроении ХД из режима “спица” в “колокол” изменяется аномальная часть электронной проводимости, что в свою очередь негативно сказывается на интегральных параметрах и температурном режиме двигателя.

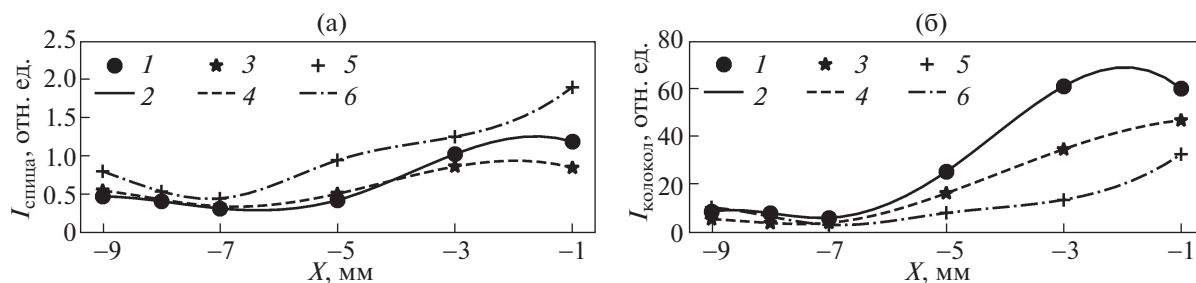


Рис. 7. Интенсивность высокочастотных волн для режимов “спица” (а) и “колокол” (б). 0 мм соответствует срезу двигателя, ось X направлена в направлении струи двигателя. 1 – 400 В, 3 – 500 В, 5 – 600 В; кривые 2, 4, 6 – кубическая интерполяция точек при напряжении соответственно 400 В, 500 В, 600 В.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проделано сравнительное экспериментальное исследование высокочастотных колебаний и волн в диапазоне 5–150 МГц в режимах горения разряда ХД, условно названных “спица” и “колокол”. Проведено сравнительное исследование структуры высокочастотных возмущений плавающего потенциала плазмы в обоих режимах. Зарегистрированные высокочастотные колебания и волны находятся в диапазоне по частоте от 5 до 150 МГц, скорость волн в азимутальном направлении по порядку величины равна 10^6 м/с, причем направление скорости волн совпадает с направлением дрейфа электронов. Закон дисперсии наблюдаемых волн близок к линейному. Интенсивность волн в режиме “колокол” более чем в 10 раз превосходит интенсивность в режиме “спица”. Наряду со скачкообразным изменением интегральных параметров при перестроении двигателя скачкообразно изменяется структура высокочастотных колебаний и волн. Рост интенсивности волн происходит одновременно с увеличением электронной проводимости, что косвенно подтверждает, что перестроение связано с резким изменением электронной проводимости за счет аномальных механизмов переноса электронной компоненты на высокочастотных волнах, которые имеют азимутальную компоненту электрического поля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Морозов А.И. Плазменные ускорители. М.: Машиностроение, 1973. С. 85.
2. Морозов А., Кислов А., Зубков И. // Письма в ЖЭТФ. 1968. Т. 7. С. 224.
3. Жаринов А., Ерофеев В., Гришин С. Плазменные ускорители. М.: Машиностроение, 1973. С. 54.
4. Kim V. // J. Propulsion and Power. 1998. V. 14. P. 736. <https://doi.org/10.2514/2.5335>
5. Morozov A.I., Savelyev V.V. in Reviews of Plasma Physics. Vol. 21 / Ed. by B.B. Kadomtsev and V.D. Shafranov. New York: Consultant Bureau, 2000. P. 203.
6. Горшков О., Муравлев В., Шагайда А. Холловские и ионные плазменные двигатели для космических аппаратов / Под ред. А. Коротева. М.: Машиностроение, 2008. Гл. 1.
7. Хмелевской И.А., Томилин Д.А. // ЖТФ. 2019. Т. С. 1360.
8. Ловцов А.С., Томилин Д.А., Шашков А.С. // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. Вып. 17. С. 60.
9. Azziz Y. Experimental and Theoretical Characterization of a Hall Thruster Plume, PhD thesis. Massachusetts Institute of Technology, 2007.
10. Conversano R.W., Goebel D.M., Mikellides I.G., Hofer R.R., Matlock T.S., Wirz R.E. // AIAA, 2014. AIAA-3896. <https://doi.org/10.2514/6.2014-3896>
11. Kostin A.N., Lovtsov A.S., Vasin A.I., Vorontsov V.V. // 33^d Int. Electric Propulsion Conf., USA, 2013. IEPC-2013-055.
12. Ding Y., Boyang J., Sun H., Wei L., Peng W., Li P., Yu D. // Adv. Space Res. 2017. V. 63. P. 837. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.11.003>
13. Ding Y., Sun H., Li P., Wei L., Xu Y., Peng W., Su H., Yu D. // Vacuum. 2017. V. 143. P. 251. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2017.06.030>
14. Морозов А.И., Бугрова А.И., Десятков А.В., Ермаков Ю.А., Козинцева М.В., Липатов А.С., Пушкин А.А., Харчевников В.К., Чурбанов Д.В. // Физика плазмы. 1997. Т. 23. С. 635.
15. Тилинин Г.Н. // ЖТФ. 1977. Т. 47. С. 1684.
16. Voeuf J.-P. // J. Appl. Phys. 2017. V. 121. 011101.
17. Nikitin V., Tomilin D., Lovtsov A., Tarasov A. // Letters J. Exploring the Frontiers of Physics (EPL). 2017. V. 117. 45001. <https://doi.org/10.1209/0295-5075/117/45001>
18. Choueiri E.Y. // Phys. Plasmas. 2001. V. 8. P. 1411.
19. Шишкин Г.Г., Герасимов В.Ф. // ЖТФ. 1975. Т. 45. С. 1847.
20. Есипчук Ю.В., Тилинин Г.Н. // ЖТФ. 1976. Т. 46. С. 718.

21. *Кирдяшев К.П., Бугрова А.И., Десятников А.В., Харчевников В.К.* // Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35. Вып. 4. С. 14.
22. *Tomilin D.* // Phys. Plasmas. 2013. V. 20. 042103.
23. *Litvak A.A., Fisch N.J.* // Phys. Plasmas. 2004. V. 11. P. 1379.
24. *Lazurenko A., Coduti G., Mazouffre S., Vonhomme G.* // Phys. Plasmas. 2008. V. 15. 034502.
25. *Горшков О.А., Томилин Д.А., Шагайда А.А.* // Физика плазмы. 2012. Т. 38. С. 298.
26. *Litvak A.A., Raitses Y., Fisch N.J.* // Phys. Plasmas. 2004. V. 11. P. 1701.
27. *Lazurenko A., Krasnoselskikh V., Bouchoule A.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 2008. V. 36. P. 1977.
28. *Knoll A.K., Cappelli M.A.* // 31st Int. Electric Propulsion Conf., University of Michigan, USA, 2009. IEPC-2009-099.
29. *Питерский В.В., Пастухов В.П., Иоффе М.С., Канев Б.И., Юшманов Е.Е.* // Физика плазмы. 1988. Т.14. С. 170.
30. *Питерский В.В., Пастухов В.П., Юшманов Е.Е.* // Физика плазмы. 1987. Т. 13. С. 51.