## = ДИНАМИКА ПЛАЗМЫ

УДК 533.9

# КОМПЛЕКСНОЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ ГОРЕНИЯ РАЗРЯДА ХОЛЛОВСКОГО ДВИГАТЕЛЯ "СПИЦА" И "КОЛОКОЛ"

© 2020 г. И. А. Хмелевской<sup>*a,b,\**</sup>, А. С. Шашков, Д. Д. Криворучко<sup>*b*</sup>, Д. А. Кравченко<sup>*a*</sup>, Д. А. Томилин<sup>*a*</sup>

<sup>а</sup> ГНЦ "Центр Келдыша", Москва, Россия <sup>b</sup> Московский физико-технический институт (Государственный университет), Долгопрудный, Московская область, Россия \*e-mail:khmelevskoi@kerc.msk.ru Поступила в редакцию 28.10.2019 г. После доработки 13.12.2019 г. Принята к публикации 19.12.2019 г.

Для холловских двигателей наблюдается два устойчивых режима горения разряда, получивших название "спица" и "колокол". Эти режимы существенно отличаются по форме плазменной струи и анодному КПД. Приводятся результаты измерений высокочастотных колебаний плавающего потенциала плазмы с помощью зонда Ленгмюра и относительной скорости эрозии керамических изоляторов из нитрида бора (BN) с помощью пассивной оптической диагностики в режимах "спица" и "колокол". Исследования проводились в холловском двигателе со средним диаметром разрядного канала 77 мм и мощностью до 2.5 кВт.

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

DOI: 10.31857/S0367292120060037

#### 1. ВВЕДЕНИЕ

Согласно экспериментальным данным, холловский двигатель (ХД) (также в литературе используется название стационарный плазменный двигатель (СПД) или плазменный ускоритель с замкнутым дрейфом электронов) [1, 2] может работать в нескольких режимах работы [3-11], которые существенно отличаются друг от друга по выходным и удельным характеристикам (тяга, удельный импульс тяги, КПД, тепловое состояние конструкции). При этом разные режимы горения разряда наблюдаются при небольших изменениях входных параметров работы двигателя (расход, напряженность магнитного поля, напряжение разряда). Также наблюдается переходный режим работы, когда входные параметры работы двигателя не меняются, но режимы горения разряда двигателя резко сменяют друг друга.

В ГНЦ ФГУП "Центр Келдыша" было проведено комплексное исследование двух режимов горения разряда, наблюдаемых при работе лабораторной модели ХД с выдвинутым слоем с диаметром средней линии разрядного канала 77 мм и мощностью до 2.5 кВт. В данном случае слоем называется область разряда, которая содержит основное электрическое поле (в других работах эта область также часто называется зоной ускорения). Вынесение слоя достигается выдвижением максимума магнитного поля на среднем диаметре разрядного канала вперед по потоку за срез выходной плоскости двигателя и подбором формы профилей выходных изоляторов под конфигурацию магнитных силовых линий. Особенность конструкции двигателей с выдвинутым слоем позволяет уменьшить ионный поток на стенки и продлить ресурс работы двигателя [12]. Предельный случай, при котором плазменный слой выдвинут за срез двигателя настолько, что плазма, контактирующая с керамическими изоляторами, имеет потенциал, близкий к анодному, называет-"магнитным экранированием" ("magnetся icshielding") [13, 14]. Первая часть исследования, в ходе которой определялись интегральные параметры двигателя в двух режимах, опубликована в работе [3]. В данной работе приводится вторая часть исследования, содержащая результаты измерений высокочастотных колебаний плавающего потенциала с помощью зонда Ленгмюра и измерений относительной величины эрозии керамических изоляторов на основе интенсивности

N⁰	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Напряжение разряда, В	500	600	600	700	700	900	1000	700	800	900
Расход газа, мг/с	2.0	2.0	3.0	2.5	3.0	2.5	2.5	2.0	2.0	2.0

Таблица 1. Режимы работы двигателя, в которых проводились измерения

свечения спектральной линии дублета бора, входящего в состав керамики.

Исследование интегральных параметров работы данного ХД показало, что перестроения наблюдаются при напряжении разряда выше 500 В [3]. Оптимальный с точки зрения анодного КПД режим горения был назван "спица", а режим с пониженным КПД – "колокол". Названия ассоциативно отображают форму плазменной струи, характерную для этих режимов. Помимо изменения формы плазменной струи, основными отличительными признаками перестроения разряда являлись: увеличение тока разряда на 10-30% и падение анодного КПД двигателя на 5-20%. Подобные перестроения разряда наблюдались также в ряде других работ [4-11]. Также в работе [3] было показано, что в режиме "колокол" на 20-40% увеличивается температура конструктивных элементов двигателя, что может являться следствием смещения положения максимума температуры электронов и слоя ускорения вглубь разрядного канала [5]. Перестроения разряда из режима "спица" в режим "колокол" происходят при уменьшении расхода газа или при увеличении напряженности магнитного поля. В работе [3] было высказано предположение, что это может быть причиной уменьшения величины электронной проводимости в разрядном канале ХД, что в свою очередь приводит к перестроению из режима "спица" в режим "колокол". В данной работе для каждого исследуемого значения напряжения разряда и расхода газа изменялось магнитное поле, причем повышение величины магнитного поля приводило к перестроению из режима "спица" в режим "колокол". Изменения в уровне электронной проводимости за счет неклассических механизмов должны приводить к изменению на спектре осцилляций в разрядном канале [15-23]. Исследованию различий спектров осцилляций в лиапазоне 5–150 МГи в двух режимах и посвящена первая часть данной работы. Результаты измерений позволяют подтвердить предположение о влиянии проводимости плазмы на перестроение разряда.

В ходе проведения ресурсных испытаний, по мере распыления выходных изоляторов, ХД также может перестраиваться между режимами горения разряда "спица" и "колокол". Это было показано на примере двигателя КМ-60 [4]. В настоящий момент нет данных о влиянии режима работы "колокол" на ресурс работы двигателя. Можно предположить, что увеличение температуры полюсов двигателя свидетельствует о повышенной плотности потока плазмы на стенки разрядного канала, что может приводить к увеличению скорости эрозии и сокращению ресурса работы. Вторая часть данного исследования была проведена с целью проверки этой гипотезы.

#### 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА, ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Испытания проводились на базе ГНЦ ФГУП "Центр Келдыша" на установке КВУ-90 с диаметром вакуумной камеры 3.8 м и длиной 8 м [24]. Описание оборудования, условия и методика проведения эксперимента детально изложены в работе [3]. В качестве рабочего тела использовался ксенон. Характерное значение магнитного поля в канале двигателя составляет 200 Гс. Характерное значение градиента магнитного поля – 10 Гс/мм. Измерение относительной скорости эрозии происходило одновременно с измерением интегральных параметров режимов горения разряда. Исследование колебаний с помощью зонда Ленгмюра проходило отдельно от измерения скорости эрозии, чтобы минимизировать влияние зонда на результаты измерений относительной скорости эрозии. Режимы работы, в которых проводились измерения приведены в табл. 1. Измерение колебаний плавающего потенциала проводилось во всех 10 режимах. Измерение скорости эрозии проводилось только в первых 7 режимах. Отметим также, что зонд Ленгмюра не производил существенного влияния на разряд двигателя, так как ток разряда при наличии зонда не изменялся.

Колебания плавающего потенциала плазмы измерялись при помощи электрической схемы, изображенной на рис. 1. Значения емкостей разделительных конденсаторов равны  $C_1 = C_3 = 660 \text{ п}\Phi$ . Конденсатор  $C_1$  позволяет измерять только переменную часть плавающего потенциала плазмы, а конденсатор  $C_2$  и резисторы  $R_1$  и  $R_2$  образуют П-образный фильтр верхних частот. Зонд был расположен сразу за срезом разрядного канала. Условная схема двигателя и расположение зонда в эксперименте изображено на рис. 2.

Схема установки для регистрации спектра оптического излучения представлена на рис. 3. Конструкция исследуемого двигателя отличается от



Рис. 1. Электрическая схема измерения сигнала с зонда Ленгмюра.

классической конструкции СПД тем, что разрядная камера выполнена по гибридной схеме, т.е. разрядная камера выполнена из проводящего материала, а изолятор между разрядной камерой и корпусом двигателя имеет вид керамического кольца. Диаметр оптического пятна на двигателе составлял порядка 5 см, что позволяет полностью разрешить всю видимую часть поверхности керамического кольца (см. рис. 3а). Принцип работы установки следующий. Объектив 6, закрепленный на кварцевом измерительном окне 13, наводится на область керамических изоляторов ХД. Собранное объективом излучение по оптоволоконному кабелю 4 передается в согласующую систему 3. Находящийся на оптическом столе с пассивной виброизоляцией 8, монохроматор 1 раскладывает полученное излучение на спектр и передает его на матрицу 2. Матрица 2 преобразует спектр в цифровой вид и по кабелю 12 передает его для обработки на компьютер 11. После окончания измерений спектров плазмы, оптоволоконный кабель 4 отсоединяется от объектива 6 и присоединяется к калибровочному источнику оптического излучения 7 с известным спектром. По искажению калибровочного спектра восстанавливается истинный спектр излучения плазмы.

Эксперимент проходил в течение нескольких дней. Чтобы исключить влияние климатических условий на работу монохроматора, каждый день измерялся спектр выключенного двигателя для вычитания фоновой засветки, и производилась калибровка данных по спектру калибровочной лампы.

Методы оценки относительной скорости эрозии изложены в работах [25-31]. В данной работе использовалась методика, предполагающая корональное приближение [32] и для эродируемого вещества, и для ксенона, а также использование актинометрической гипотезы [29]. В корональном приближении считается, что частота столкновений атомов меньше частот ралиационных переходов. Атомы и ионы возбуждаются непосредственно из основного состояния электронным ударом. Соблюдается баланс энергии, приобретенной в процессе ударной ионизации и возбуждения и потерянной в процессе излучательной рекомбинации и спонтанного распада. Актинометрическая гипотеза предполагает, что переходы с близкими квантовыми параметрами имеют схожие зависимости сечения возбуждения от температуры электронов. Эти приближения дополняются теорией опорной линии, базирующейся на том, что макропараметры плазмы одинаково входят в выражения интенсивностей спектральных линий любого элемента плазмы. Таким образом, можно показать, что относитель-



**Рис. 2.** Условная схема исследуемого двигателя и расположение ленгмюровского зонда в эксперименте: *1* – характерное распределение магнитного поля на среднем диаметре разрядного канала, *2* – характерное распределение потенциала на среднем диаметре разрядного канала.



**Рис. 3.** Схема установки для регистрации спектра оптического излучения (a): *1* – монохроматор Horiba iHR550, *2* – охлаждаемый CCD детектор Syncerity, *3* – оптическая согласующая система, *4* – оптоволоконный кабель, *5* – альтернативное подключение оптоволоконного кабеля, *6* – объектив с системой позиционирования, *7* – калибровочный источник излучения, *8* – оптический стол на пассивной виброизоляции, *9* – ХД и плазменная струя, *10* – вакуумная камера, *11* – персональный компьютер, *12* – соединительные кабели CCD детектора, *13* – кварцевое измерительное окно; схематическое изображение оптического пятна относительно керамических поверхностей двигателя (б).

ная скорость эрозии керамических изоляторов, пропорциональная концентрации атомов бора в плазме, будет пропорциональна отношению интенсивностей спектральных линий бора и ксенона

$$S \propto n_{\rm B} \propto \frac{I_{\rm B} I_{\rm Xe_1}}{I_{\rm Xe_2}},$$

где S — скорость относительной эрозии,  $n_{\rm B}$  — концентрация атомов бора,  $I_{\rm B}$  — интегральная интенсивность излучения спектральной линии бора,  $I_{\rm Xe_1}$  и  $I_{\rm Xe_2}$  — интегральная интенсивность излучения отличных спектральных линий ксенона.

Исходя из вышеописанных приближений, рабочими линиями ксенона был выбран переход на 828.01 нм за счет возбуждения нейтрального атома и переход на 484.433 нм за счет возбуждения иона ксенона электронным ударом. Рабочими линиями бора для оценки концентрации бора в плазме был выбран дублет на 249.677 и 249.773 нм.

При обработке спектров, после вычитания из спектра излучения плазмы фонового спектра, оставшийся фоновый световой шум аппроксимировался полиномом второго порядка и вычитался математически.

Поскольку ширина линий бора и ксенона уже аппаратной функции на несколько порядков,

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ том 46 № 6 2020

форма спектральных линий определялась полностью последней.

#### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ СПЕКТРОВ ВЧ-КОЛЕБАНИЙ

В рамках данной работы исследовались высокочастотные колебания плавающего потенциала плазмы в диапазоне 5–150 МГц. Пример сигналов при работе двигателя в режимах "спица" и "колокол" для напряжения разряда показана рис. 4а и б.

Спектры колебаний для расхода 2.0, 2.5 и 3.0 мг/с показаны на рис. 5-7 соответственно. По оси ординат выбран логарифмический масштаб. Спектры представляют собой набор эквидистантных резонансов с разницей около 10 МГц. Амплитуда колебаний в режиме "колокол" в основном выше по сравнению с режимом "спица", причем наибольшее увеличение в амплитуде наблюдается в области частот от 50 до 150 МГц. То есть наблюдается корреляция между амплитудой ВЧ-колебаний и режимом горения разряда: в режиме "колокол" амплитуда колебаний выше приблизительно в 5 раз в диапазоне частот 50-150 МГц. Также относительное увеличение амплитуды в режиме "колокол" по сравнению с режимом "спица" растет с увеличением расхода при постоянном напряжении разряда. При этом с



**Рис. 4.** Пример сигнала с зонда в режимах "спица" (а) и "колокол" (б) для напряжения разряда 700 В и расхода газа 3 мг/с.

увеличением расхода также увеличивается диапазон устойчивой работы в режиме "спица" по магнитному полю [3].

Можно предположить, что последовательные эквидистантные резонансы соответствуют азимутальным гармоникам с последовательным изменением номера моды с длиной волны  $\lambda = 2\pi r/m$ , где m — номер моды, r — радиус. Из данного предположения следует, что закон дисперсии для обнаруженных волн близок к линейному, причем все гармоники распространяются с приблизительно одинаковой скоростью. Тогда в рамках данной гипотезы можно оценить скорость этих гармоник в азимутальном направлении. Согласно оценке, скорость колебаний приблизительно равна  $2.5 \times 10^6$  м/с, что по порядку величины соответствует дрейфовой скорости электронов. Максимум на спектрах колебаний на частоте 10 МГц соответствует гармонике с номером моды m = 1 и длиной волны 0.25 м (длина окружности средней линии разрядного канала составляет 0.24 м). Эквидистантные резонансы от 10 МГц до 140 МГц с разницей около 10 МГц соответствуют номерам моды от 1 до 14 с длиной волны соответственно от 0.25 м до 0.018 м. Волны с аналогичными свойствами экспериментально наблюдались в работах [18-21] и, по-видимому, относятся к классу градиентно-дрейфовых неустойчивостей. Градиентно-дрейфовые волны способны приводить к увеличению электронной проводимости плазмы в аксиальном направлении. Отметим, что результаты теоретических исследований градиентно-дрейфовых волн [16, 17, 20-23] отличаются от результатов экспериментов: в гидродинамическом приближении для длинноволновых гармоник с низкими значениями номера моды предсказывается неустойчивость для частот меньше 0.5 МГц и скоростей волн на порядок ниже полученного в эксперименте. Возможный механизм перехода от медленных мод к модам со скоростями, близкими к скорости дрейфа обсуждался в работе [23]. Таким образом, увеличение амплитуды колебаний при перестроении двигателя косвенно подтверждает, что в режиме "колокол" аномальная часть электронной проводимости увеличивается за счет взаимодействия высокочастотных колебаний и волн с плазмой.

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ СКОРОСТИ ЭРОЗИИ

Полный спектр двигателя в номинальном режиме приведен на рис. 8а. Спектр имеет ярко выраженный участок в ультрафиолетовом диапазоне, поскольку линза была просветлена специально на этот диапазон для измерения излучения линий дублета бора. Типичный внешний вид спектральных линий дублета бора 250 нм, иона ксенона 484 нм и нейтрального ксенона 828 нм представлен на рис. 86-г.

За единицу скорости эрозии была принята скорость в режиме при напряжении разряда 800 В и расходе 3.5 мг/с. В дальнейшем измеренная в различных режимах скорость эрозии нормировалась на эту величину. На рис. 9а приведена гистограмма относительной скорости эрозии, измеренной для всех режимов работы двигателя. По оси абсцисс отложен номер режима, по оси ординат — относительная скорость эрозии. Синие столбцы — это относительная скорость эрозии,



**Рис. 5.** Спектры колебаний плавающего потенциала плазмы для расхода ксенона 2 мг/с и напряжения разряда 500 (а), 600 (б), 700 (в), 800 (г), 900 В (д).



**Рис. 6.** Спектры колебаний плавающего потенциала плазмы для расхода ксенона 2.5 мг/с для напряжения разряда 700 (а), 900 (б), 1000 В (в).

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ том 46 № 6 2020



**Рис. 7.** Спектры колебаний плавающего потенциала плазмы для расхода ксенона 3 мг/с и напряжения разряда 600 (а) и 700 В (б).



**Рис. 8.** Полный спектр холловского двигателя с вынесенным слоем в номинальном режиме работы (а), внешний вид спектральной линии дублета бора 250 нм (б), внешний вид спектральной линии иона ксенона 484 нм (в), внешний вид спектральной линии нейтрального ксенона 828 нм (г).

полученная интегрированием интенсивности спектральной линии дублета бора 249.677 нм, а красные столбцы — спектральной линии 249.773 нм. Семь измерений были проведены в режиме работы "спица", и семь — в режиме "колокол". Над каждым из столбцов подписано напряжение разряда, при котором работал двигатель в данном режиме. Каждая группа столбцов с одинаковым напряжением разряда выстроена слева направо по увеличению расхода рабочего тела. Синие и красные столбцы для всех режимов имеют одинаковую в пределах погрешности измерений высоту, что свидетельствует о справедливости методики обработки неразрешенных линий дублета бора 250 нм. Однако стоит отметить, что отношение скоростей эрозии друг к другу, рассчитанных по линиям 249.677 и 249.773 нм, отличается для "спицы" и для "колокола". Наглядно это показано на рис. 96, из которого следует, что отношение скоростей эрозии, полученных по

#### КОМПЛЕКСНОЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ



**Рис. 9.** Результаты измерений: относительная скорость эрозии в различных режимах работы двигателя (а), отношение скорости эрозии посчитанной по интенсивности спектральной линии бора 249.677 нм к скорости, посчитанной по интенсивности спектральной скорости эрозии при увеличении расхода рабочего тела в анод в обоих режимах работы при различных напряжениях (в), изменение относительной скорости эрозии посчительной скорости эрозии нормированной на расход газа при изменении напряжения разряда (г).

разным линиям дублета бора, в "колоколе" оказалось выше, чем отношение скоростей эрозии в "спице". Это может свидетельствовать об изменении точности коронального приближения при переходе в режим "колокол" в связи с сильным изменением формы горения разряда, наблюдаемыми при данном перестроении. Также рис. 96 свидетельствует о величине погрешности при расчете относительной скорости эрозии, равной примерно 15%.

Поскольку существенной разницы между значениями скорости эрозии, посчитанными по линиям 249.677 и 249.773 нм, нет, все полученные в дальнейшем значения относительной скорости эрозии приведены на основе интенсивности линии 249.677 нм.

Для дополнительной проверки данных, полученных в эксперименте, было проведено измерение скорости эрозии в режиме "спица" при изменении расхода рабочего тела. Скорость эрозии должна быть пропорциональная расходу рабочего тела. На рис. 9в показано, что при увеличении расхода в обоих режимах для всех напряжений разряда наблюдается линейное увеличение относительной скорости эрозии керамических изоляторов, что подтверждает применимость изложенной выше методики.

Из рис. 9г следует, что в обоих режимах относительная скорость эрозии растет с увеличением напряжения. Однако в режиме колокол скорость эрозии при тех же параметрах работы двигателя оказалась ниже на 20–80%, несмотря на то, что температура двигателя при этом растет [3]. При этом с увеличением напряжения разряда разница в скорости эрозии падает. Этот результат противоречит изначальному предположению о том, что скорость эрозии в "колоколе" должна быть выше, поскольку поток тепла на стенку разрядной камеры в "колоколе выше".

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ том 46 № 6 2020

Стоит, однако, напомнить, что согласно рис. 9б отношение скоростей эрозии, посчитанное по различным спектральным линиям дублета бора 250 в "колоколе", отличается от отношения в "спице". Это может являться признаком того, что в режиме "колокол" за счет изменения формы струи меняется и коэффициент пропорциональности между концентрацией распыленного бора в плазме и концентрацией атомов и ионов ксенона. В таком случае сравнение относительной скорости эрозии в режимах "спица" и "колокол" может оказаться некорректным. Однако данная методика позволяет провести сравнение тенденций изменения скорости эрозии в каждом из режимов при изменении параметров работы. Согласно измерениям, рост скорости эрозии с увеличением расхода линеен в обоих случаях, а рост скорости эрозии от напряжения разряда немного ниже, чем при изменении расхода. Это говорит о схожести влияния изменения параметров работы двигателя в сравниваемых режимах на ресурсные характеристики.

#### 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ГНЦ ФГУП "Центр Келдыша" проведено комплексное сравнительное экспериментальное исследование двух режимов горения разряда "спица" и "колокол" на модели ХД с выдвинутым слоем диаметром 77 мм и мощностью до 2.5 кВт. В первой части проведено сравнительное исследование высокочастотных колебаний плавающего потенциала с помощью ленгмюровского зонла в диапазоне 5-150 МГц. Полученные спектры колебаний представляют собой набор эквидистантных резонансов с разницей по частоте около 10 МГц. Амплитуда колебаний в режиме "колокол" существенно выше по сравнению с режимом "спица", что косвенно подтверждает, что аномальная часть электронной проводимости увеличивается в режиме "колокол" за счет взаимодействия электронов с высокочастотными колебаниями и волнами.

Также в данной работе методом оптической спектроскопии измерена относительная скорость эрозии в двух режимах горения разряда в холловском двигателе с выдвинутым слоем.

Измерения относительной скорости эрозии оптическим методом показали более низкую скорость эрозии в режиме "колокол", однако разное значение скоростей эрозии, посчитанных по линиям 249.677 и 249.773 нм, в режиме "спица" и в режиме "колокол" свидетельствуют об изменении коэффициента пропорциональности реальной концентрации бора в плазме измеренному значению ее интенсивности. Это свидетельствует о существенном изменении структуры разряда при перестроении, что также является важным результатом. Также получены данные, позволяющие утверждать, что изменение относительной скорости эрозии в режиме "спица" и в режиме "колокол" с изменением входных параметров работы носит одинаковый характер.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Kim V. // J. PropulsionPower. 1998. V. 14. P. 736.
- Morozov A.I., Savelyev V.V. // Rev. Plasma Phys. V. 21 / Eds. B.B. Kadomtsev, V.D. Shafranov. N.Y.: Consultant Bureau, 2000. P. 203.
- 3. Хмелевской И.А., Томилин Д.А. // ЖТФ. 2019. Т. 89. С. 1360.
- Kostin A.N., Lovtsov A.S., Vasin A.I., Vorontsov V.V. // Proc. 33th Internat. Electric Propulsion Conf., Washington, 2013. P. IEPC-2013-055.
- 5. Ловцов А.С., Томилин Д.А., Шашков А.С. // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. С. 60.
- 6. Sekerak M.J. PhD thesis. Univ. of Michigan, 2014.
- Conversano R.W., Goebel D.M., Mikellides I.G., Hofer R.R., Matlock T.S., Wirz R.E. // Proc. 50th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conf. Cleveland, 2014.
- Ding Y., Boyang J., Sun H., Wei L., Peng W., Li P., Yu D. // Adv. Space Res.2018. V. 61. P. 837.
- Ding Y., Sun H., Li P., Wei L., Xu Y., Peng W., Su H., Yu D. // Vacuum. 2017. V. 143. P. 251.
- Han L., Wei L., Yu D. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2016. V. 49. P. 375203.
- 11. Azziz Y. PhD thesis. MIT, 2007.
- Zakharenkov L.E., Kim V., Lovtsov A.S., Semenkin A.V., Solodukhin A.E. // Proc. Space Propulsion 2018 Conf.SP2018. Seville, Spain, 2018. P. 00195.
- Mikellides I.G., Katz I., Hofer R.R., Goebel D.M. // J. Appl. Phys. 2014. V. 115. P. 043303.
- Hofer R.R., Goebel D.M., Mikellides I.G., Katz I. // J. Appl. Phys. 2014. V. 115. P. 043304.
- 15. Boeuf J.-P. // J. Appl. Phys. 2017. V. 121. P. 011101.
- 16. Tomilin D. // Phys. Plasmas. 2013. V. 20. P. 042103.
- 17. Nikitin V., Tomilin D., Lovtsov A., Tarasov A. // European Phys. Lett. 2017. V. 117. P. 45001.
- Litvak A., Raitses Y., Fisch N.J. // Phys. Plasmas. 2004. V. 11. P. 1701.
- 19. Lazurenko A., Krasnoselskikh V., Bouchoule A. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2008. V. 36. P. 1977.
- 20. Тилинин Г.Н. // ЖТФ. 1977. Т. 47. С. 1684.
- 21. Есипчук Ю.В., Тилинин Г.Н. // ЖТФ. 1976. Т. 46. С. 718.
- Marusov N.A., Sorokina E.A., Lakhin V.P., Ilgisonis V.I., Smolyakov A.I. // Plasma Sources Sci. Technol. 2019. V. 28. P. 015002.
- Smolyakov A.I., Chapurin O., Frias W., Koshkarov O., Romadanov I., Tang T., Umansky M., Raitses Y., Kaganovich I.D., Lakhin V.P. // Plasma Phys. Control. Fusion. 2017. V. 59. P. 014041.
- Gorshkov O.A., Ilyin A.A., Rizakhanov R.N. // Proc. 6th Propulsion for Space Transportation of the XXIst Century, Versailles, 2002.

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ том 46 № 6 2020

- 25. Celik M., Batishchev O., Martinez-Sanchez M. // Vacuum. 2010. V. 84. P. 1085.
- Pagnon D., Touzeau M., Lasgorceix P. // Proc. 40<sup>th</sup> AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conf. Fort Lauderdale, 2004. P. 3773.
- Pagnon D., Lasgorceix P., Touzeau M. // Proc. 4th Internat. Spacecraft Propulsion Conf. Chia Laguna, 2004. P. 555.
- Pagnon D., Pellerin S., Dudeck M., Maksimenko T.A., Loyan A.V., Koshelev N.N., Boutaghane A. // Proc. XXVIII Internat. Conf. Phenomena in Ionized Gases (ICPIG 2007), Prague, 2007. P. 1677.
- 29. Coburn J.W., Chen M. // J. Appl. Phys. 1980. V. 51. P. 3134.

- Cho S., Yokota S., Hara K., Takahashi D., Arakawa Y., Komurasaki K., Kobayashi A. // Proc. 46th AIAA Joint Propulsion Conf., AIAA-2010-6697, Nashville, 2010.
- 31. Дышлюк Е.Н. Дисс. по ВАК 01.04.08.М.: МФТИ, 2008.
- 32. Хаддлстоун Р., Леонард С. Диагностика плазмы. М.: Мир, 1967.
- Chase Jr M.W., Tables N.J.T. // J. Phys. Chem. 1998. V. 9. P. 1–1951.
- Mikellides I.G., Katz I., Hofer R.R., Goebel D.M. // Proc. 46th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conf. & Exhibit, Nashville, 2010. P. 6942.