

04.1;12.2

Исследование режимов горения разряда „спица“ и „колокол“ на холловском двигателе мощностью 1.5 kW

© И.А. Хмелевской^{1,2}, Д.А. Томилин¹¹ ГНЦ ФГУП „Центр Келдыша“, Москва, Россия² Московский физико-технический институт (Национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Московская обл., Россия

E-mail: khmelevskoi@kerc.msk.ru

Поступило в Редакцию 10 февраля 2020 г.

В окончательной редакции 10 февраля 2020 г.

Принято к публикации 28 февраля 2020 г.

Экспериментально исследованы два режима горения разряда — „спица“ и „колокол“ — для холловского двигателя номинальной мощностью 1.5 kW. Измерены интегральные параметры работы двигателя (тяги, удельный импульс тяги) в двух устойчивых режимах горения разряда. Исследования проводились для напряжений разряда 300–800 V и расхода газа от 1.5 до 3 mg/s. Проведено сравнение с результатами аналогичных экспериментов для геометрически подобного двигателя с большим диаметром разрядного канала.

Ключевые слова: электроракетные двигатели, холловские двигатели, параметры эффективности, устойчивость горения разряда, режимы горения разряда.

DOI: 10.21883/PJTF.2020.10.49429.18240

Опыт экспериментальных исследований показывает, что холловский двигатель (ХД) может работать в нескольких режимах горения разряда [1–5], которые существенно отличаются друг от друга по выходным и удельным характеристикам (тяги, удельный импульс тяги, КПД, тепловое состояние конструкции). В работе [1] были обнаружены и исследованы два режима горения разряда, которые в соответствии с визуальной наблюдаемой формой плазменной струи были названы „спица“ (оптимальный) и „колокол“ (неоптимальный). Основными отличительными признаками перестроений из режима „спица“ в режим „колокол“ являются изменение формы плазменной струи, увеличение тока разряда, падение анодного КПД. Перестроения разряда между режимами снижают ресурсные характеристики ХД и препятствуют построению обоснованного прогноза длительности устойчивой работы ХД при эксплуатации в составе космических аппаратов, поэтому исследование устойчивости работы ХД является важной и актуальной задачей.

В работе [1] было показано, что перестроения из режима „спица“ в режим „колокол“ происходят либо при увеличении значения магнитного поля в разрядном канале двигателя до определенной критической величины, либо при снижении расхода газа ниже некоторого минимума при сохранении остальных параметров постоянными. Также было отмечено, что при перестроении между режимами наибольшему изменению подвергается величина электронной компоненты в токе разряда, что и приводит к существенному изменению КПД. В работе [1] сформулирована гипотеза о том, что причиной перестроения может являться фундаментальный процесс

в плазме ХД, который связан с электронной проводимостью.

Целью настоящей работы является исследование интегральных параметров работы в двух режимах горения разряда — „спица“ и „колокол“ — для двигателя со средним диаметром разрядного канала 60 mm. Измерялись интегральные параметры работы двигателя (ток разряда, тяга, удельный импульс тяги, КПД) при различных значениях напряжения и мощности разряда. Полученные результаты сравнивались с проведенными в аналогичных условиях испытаниями для геометрически подобного двигателя со средним диаметром разрядного канала 77 mm [1].

Условия проведения испытаний аналогичны условиям эксперимента, выполненного в работе [1]. Исследуемый двигатель геометрически подобен двигателю, исследованному в [1].

Расход газа в эксперименте варьировался в диапазоне от 1.5 до 3 mg/s с шагом 0.5 mg/s, напряжение разряда изменялось в диапазоне от 300 до 800 V с шагом 100 V. При каждом значении расхода газа и напряжения разряда путем изменения величины магнитного поля осуществлялся поиск точки перехода из режима „спица“ в режим „колокол“. Перестроения из режима „спица“ в режим „колокол“ достигались увеличением магнитного поля, обратное перестроение достигалось соответственно его уменьшением относительно точки перехода. Параметры струи двигателя измерялись для напряжения разряда 500 V и расхода газа 1.5 mg/s. Также заметим, что исследование проводилось в диапазоне от 300 до 800 V, однако до 400 V двигатель работал только в режиме „спица“, а свыше 700 V конструкция

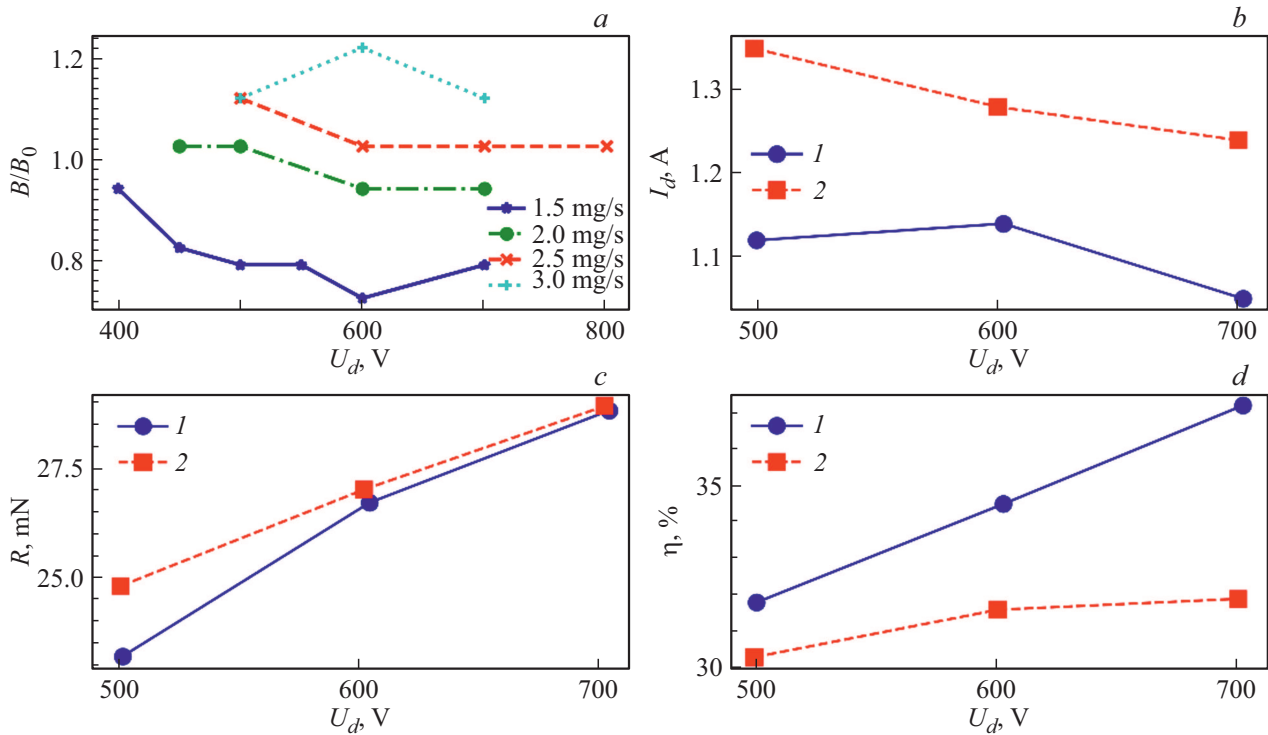


Рис. 1. *a* — относительная величина магнитного поля, при котором происходит перестроение из одного режима в другой, в зависимости от напряжения разряда при различных значениях расхода газа; *b–d* — основные параметры работы в режимах „спица“ и „колокол“: ток разряда (*b*), тяга (*c*), анодный КПД (*d*). 1 — режим „спица“, 2 — режим „колокол“.

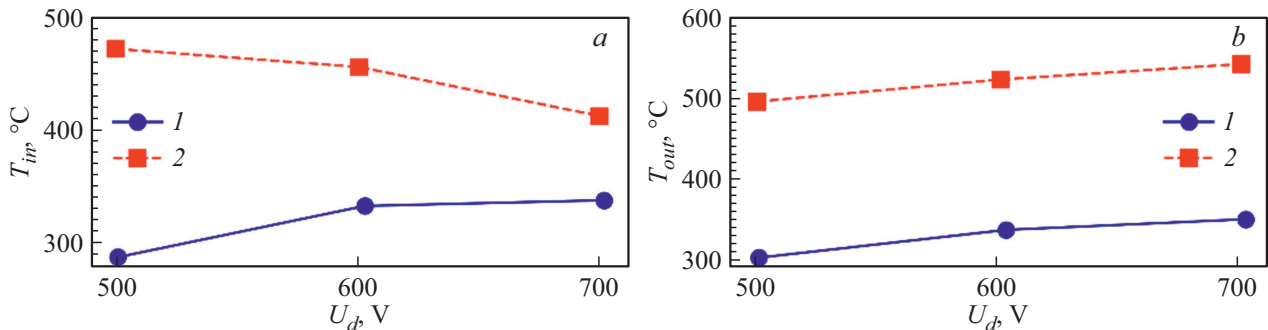


Рис. 2. Температура внутреннего (*a*) и наружного (*b*) выходных керамических изоляторов двигателя в режимах „спица“ и „колокол“ в зависимости от напряжения разряда. 1 — режим „спица“, 2 — режим „колокол“.

двигателя в режиме „колокол“ сильно перегревалась. Основные результаты приведены для диапазона напряжений 500–700 В.

На рис. 1, *a* представлены зависимости точки перехода между режимами по магнитному полю от напряжения разряда при различных значениях расхода газа. Каждая кривая делит область на две части: все точки выше кривой соответствуют работе двигателя в режиме „колокол“, все точки ниже кривой — работе в режиме „спица“. Выявленные тенденции аналогичны результатам, полученным в [1]: диапазон работы по магнитному полю в режиме „спица“ расширяется при увеличении расхода газа и сужается при увеличении напряжения разряда.

Далее проведем сравнение основных характеристик работы двигателя в режимах „спица“ и „колокол“. Для краткости изложения измеренные данные приведены только для расхода газа 1.5 мг/с, при других значениях расхода газа качественно все тенденции сохраняются. На рис. 1, *b–d* отражены основные параметры работы ХД: ток разряда, тяга, анодный КПД. При перестроении из режима „спица“ в режим „колокол“ при постоянном значении расхода газа происходит увеличение тока разряда на 10–20% (рис. 1, *b*) с одновременным незначительным увеличением тяги до 7% (рис. 1, *c*), КПД двигателя падает на 5–15% в относительных единицах (рис. 1, *d*).

На рис. 2, *a* и *b* представлены температуры внутреннего и наружного выходных изоляторов. При перестро-

Параметры эффективности работы двигателя, ионный и электронный токи в режимах горения разряда „спица“ и „колокол“ при напряжении разряда 500 V и расходе 1.5 mg/s

Режим	η_m	η_l	γ	I_i , A	I_e , A
„Спица“	0.77	0.83	0.71	0.93	0.19
„Колокол“	0.87	0.78	0.67	1.05	0.30

нии из режима „спица“ в режим „колокол“ температуры внутреннего и наружного изоляторов увеличиваются приблизительно на 100–200°C, т.е. возрастают на 50–70%. Таким образом, тепловой поток в режиме „колокол“ существенно больше, чем в режиме „спица“, что приводит к сильному перегреву конструктивных элементов двигателя.

Также была исследована структура анодного КПД двигателя при помощи методики, изложенной в [6]. В данной методике тяга и КПД представляются в виде произведения набора коэффициентов эффективности $R = \eta_m \gamma \sqrt{\frac{2m_e U_d}{e}}$, $\eta = \eta_m \eta_l \gamma^2$, где η_m — коэффициент использования рабочего тела (отношение массового тока ионов к расходу газа), η_l — коэффициент эффективности использования электронного тока (отношение тока ионов к току разряда), γ описывает снижение тяги из-за углового разброса скоростей ионов и энергетического распределения ионов. Электронный ток определялся как $I_e = I_d - I_i$, где I_d — ток разряда, I_i — ионный ток. Рассчитанные параметры эффективности и величины электронного и ионного токов в режимах горения разряда „спица“ и „колокол“ для напряжения разряда 500 V и расхода газа 1.5 mg/s представлены в таблице.

Из результатов, приведенных в таблице, видно, что коэффициент использования рабочего тела в режиме „колокол“ приблизительно на 10% выше, чем в режиме „спица“, эффективность использования электронного тока на 5% выше и коэффициент γ на 4% выше в режиме „спица“. Различие коэффициентов использования рабочего тела и эффективности использования электронного тока свидетельствует о том, что ток разряда в режиме „колокол“ растет как за счет ионной, так и за счет электронной составляющей. Отметим, что электронный ток в режиме „колокол“ выше на ~ 50%, чем в режиме „спица“.

Проведенные испытания показали, что при напряжении разряда свыше 400 V при относительно низких значениях расхода газа и достаточно высоком магнитном поле происходит скачкообразное перестроение режима горения разряда „спица–колокол“.

В целом качественно картина перестроений между режимами „спица“ и „колокол“ аналогична результатам работы [1], однако есть некоторые отличия. Изменение формы струи, рост тока разряда, падение КПД двигателя за счет увеличения электронной составляющей тока разряда, рост температуры конструктивных элементов двигателя являются общими признаками перестроения

для обоих двигателей. Однако при уменьшении геометрических размеров двигателя пороговое напряжение разряда, при котором наблюдаются перестроения в режим „колокол“, снижается. Также для двигателя с меньшим диаметром разрядного канала характерно существенное отличие в изменении коэффициента рабочего тела (увеличивается в „колоколе“ на 10%).

Таким образом, для двух геометрически подобных холловских двигателей со средним диаметром разрядного канала 60 и 77 mm подтверждено существование двух режимов горения разряда — „спица“ и „колокол“. Основными признаками перестроения являются изменение формы плазменной струи, увеличение тока разряда при постоянном значении расхода газа и падение анодного КПД. На основе полученных результатов можно говорить о том, что исследуемые режимы не являются свойством конкретной лабораторной модели ХД. Также результаты настоящей работы служат косвенным подтверждением гипотезы о том, что причиной перестроения является фундаментальный процесс в плазме ХД, который связан с электронной проводимостью. В рамках настоящей работы и работы [1] среди режимов горения ХД выделены режимы „спица“ и „колокол“, т.е. выделены подобные режимы горения разряда для двух лабораторных моделей ХД со средним диаметром разрядного канала 60 и 77 mm в широких диапазонах напряжений разряда и расхода газа.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Хмелевской И.А., Томилин Д.А. // ЖТФ. 2019. Т. 89. В. 9. С. 1360–1366. DOI: 10.21883/JTF.2019.09.48061.20-19 [Перевод: 10.1134/S1063784219090068].
- [2] Conversano R.W., Goebel D.M., Mikellides I.G., Hofer R.R., Matlock T.S., Wirz R.E., Mikellides I.G. Magnetically shielded miniature Hall thruster: performance assessment and status update // AIAA. Cleveland, USA, 2014. DOI: 10.2514/6.2014-3896
- [3] Azziz Y. Experimental and theoretical characterization of a Hall thruster plume. PhD thesis. Massachusetts Institute of Technology, 2007. 229 p.
- [4] Ловцов А.С., Томилин Д.А., Шапков А.С. // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. В. 17. С. 60–68.
- [5] Kostin A.N., Lovtsov A.S., Vasin A.I., Vorontsov V.V. Development and qualification of Hall thruster KM-60 and the flow control unit // Proc. of the 33th Int. Electric Propulsion Conf. Washington, USA, 2013. P. IEPC-2013-055.
- [6] Горшков О.А., Шагайда А.А. // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. В. 4. С. 37–43.