

03.3

Экспериментальные исследования стационарного плазменного двигателя малой мощности

© А.И. Бугрова, Г.Э. Бугров, В.А. Давыдов, А.В. Десятков,
М.В. Козинцева, А.С. Липатов, А.А. Сафронов, П.Г. Смирнов,
В.К. Харчевников, М.И. Шапошников, А.В. Пильников

Московский государственный технический университет радиотехники,
электроники и автоматики

Центральный научно-исследовательский институт машиностроения
(ФГУП ЦНИИмаш)

E-mail: bugrov@mirea.ru

Поступило в Редакцию 2 августа 2013 г.

Представлены результаты экспериментальных исследований интегральных характеристик лабораторной модели стационарного плазменного двигателя нового поколения α -40, рассчитанного на суммарную потребляемую мощность 150 W. Интегральные параметры модели, такие как тяга, разрядный ток, удельный импульс, КПД, полученные на стендах МГТУ МИРЭА и ОКБ „Факел“, оказались практически одинаковыми. Так, при вкладываемой мощности ~ 150 W, напряжении разряда 210 V, расходе ксенона 0.7 mg/s тяга составила 9.4 mN, анодный удельный импульс тяги равен ~ 1370 s, анодный КПД с учетом мощности, потребляемой катушками намагничивания, равен 41%. Другой режим с большей тягой (9.7 mN), но с меньшим удельным импульсом (1240 s) при такой же вкладываемой мощности, был получен при расходе 0.8 mg/s и напряжении 190 V. При этом КПД составил $\sim 40\%$. Полуугол расходимости струи равен $\pm 25^\circ$. Прогнозируемый ресурс составляет 2500 h. Приведенные в работе данные показывают, что эффективность α -40 выше, чем у известных аналогов.

Стационарные плазменные двигатели (СПД) находят широкое применение на борту современных космических аппаратов (КА). В настоящее время значительно вырос интерес к СПД малой мощности (меньше 200 W) как в России [1–5], так и за рубежом [6–9].

Это связано в основном с расширением работ по созданию малых КА нового поколения, которые могут быть использованы для решения

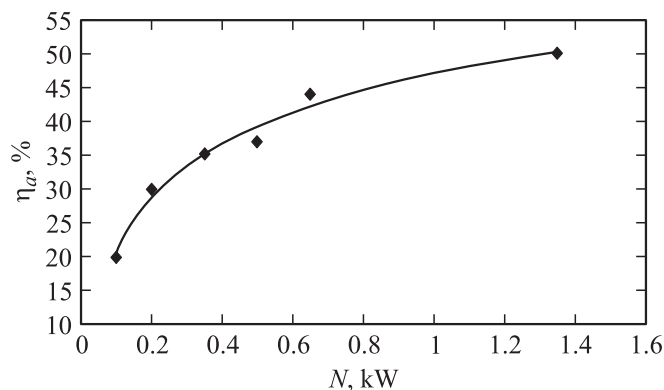


Рис. 1. Зависимость тягового КПД от мощности, вкладываемой в СПД.

задач телекоммуникации и дистанционного зондирования Земли. Функции, которые выполняет СПД на борту КА, — это коррекция орбит КА, удержание его на заданной орбите, сохранение нужной ориентации аппарата в пространстве.

Создание современных стационарных плазменных двигателей малой мощности идет как по пути масштабирования двигателей классической схемы, так и на основе модификации их магнитной системы. В первом случае работы выполняются в кооперации ОКБ „Факел“ с Исследовательским центром им. М.В. Келдыша [1,4]. Во втором случае работы выполняются ОКБ „Факел“ совместно с НИИ прикладной механики и электродинамики [2]. Многочисленные экспериментальные данные в приведенных публикациях показали, что с уменьшением потребляемой СПД мощности анодный тяговый КПД классических СПД снижается и при мощностях 100–200 W не превышает 30%. Это иллюстрирует рис. 1, на котором изображена зависимость тягового КПД от мощности, потребляемой двигателем для параметрического ряда СПД–25, 35, 50, 60, 70, 100, разработки ОКБ „Факел“. Первая точка на рисунке соответствует двигателю СПД–25, последняя СПД–100. Из рисунка видно, что у двигателя СПД–25 КПД на 30% меньше, чем у СПД–100.

В МГТУ МИРЭА при конструировании плазменных двигателей, потребляющих малую мощность, использовался как метод масшта-

бирования, основанный на критерии Меликова–Морозова, подробно описанном в публикациях [10,11], так и метод оптимизации магнитного поля, запатентованный в 1999 г. [12,13]. Целью данной работы является экспериментальная проверка возможности повышения анодного тягового КПД ускорителя малой мощности с помощью указанных методов. В результате проведенной работы была сконструирована и изготовлена лабораторная модель двигателя α -40. Габаритные размеры модели: диаметр ~ 70 mm, длина ~ 60 mm. Модель была испытана как на стенде МГТУ МИРЭА, так и на стенде ОКБ „Факел“. Экспериментально измеренные интегральные параметры, полученные на обоих стендах, практически совпали.

Интегральные характеристики лабораторной модели α -40 измерялись на стендах, вакуумные камеры которых откачивались диффузионными насосами. Приведем интегральные параметры, полученные на стенде ОКБ „Факел“. Расход ксенона в экспериментах изменялся в пределах от 0.7 до 0.9 mg/s. При этом динамическое давление не превышало $1 \cdot 10^{-4}$ mm · Hg по воздуху. Потребляемая моделью суммарная мощность, включающая мощность, затрачиваемую на катушки намагничивания, изменялась в диапазоне от 125 до 200 W.

Для трех расходов ксенона $\dot{m}_a = 0.7, 0.8$ и 0.9 mg/s измерялись вольт-амперные характеристики разряда и тяга, создаваемая ускорителем. Токи в катушках намагничивания подбирались по минимуму разрядного тока. Оказалось, что для всех расходов токи во внутренней и наружной катушках равны $I_i = I_e = 5$ A. По известным формулам рассчитывался анодный КПД с учетом суммарной потребляемой мощности анодного блока $N_\Sigma = N_p + N_k$ и удельный импульс тяги. На рис. 2 приведены вольт-амперные характеристики разряда (а), зависимость тяги (b) от разрядного напряжения для трех указанных расходов. Из рис. 2, а видно, что вольт-амперные характеристики разряда для всех расходов практически вертикальны, что характеризует хорошую степень ионизации атомов ксенона. Тяга и удельный импульс растут с ростом напряжения разряда по линейному закону. Максимальные значения тяги, полученные при $U_p = 210$ V, равны 9.4, 10.6 и 12.5 mN для расходов 0.7, 0.8 и 0.9 mg/s соответственно. Удельный импульс при этом напряжении равен 1370, 1380 и 1410 s, и тяговый анодный КПД достигает величины 43.8% при расходе 0.9 mg/s. Однако мощность, потребляемая ускорителем при этом расходе, превышает 150 W. Это видно из рис. 3, где для этих режимов изображены кривые зависимости

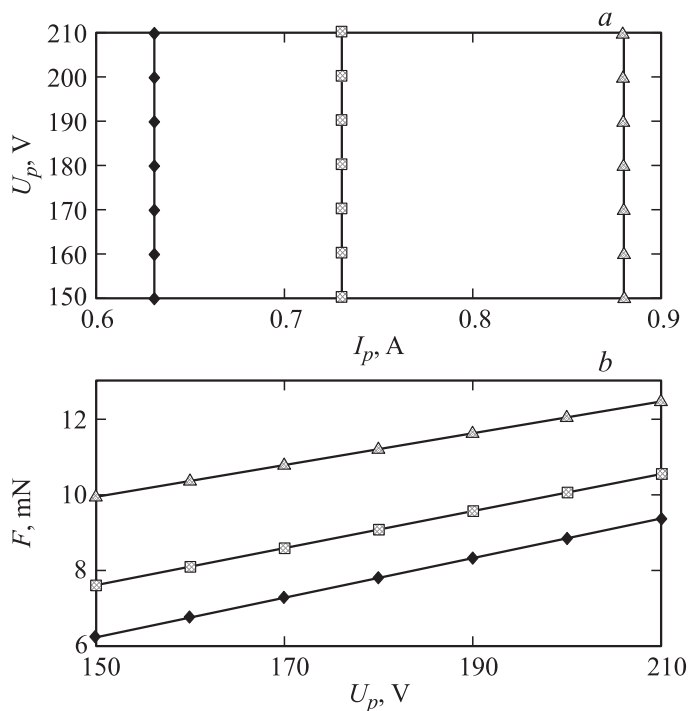


Рис. 2. Зависимость интегральных характеристик модели α -40 от напряжения и расхода ксенона: \blacklozenge — $\dot{m}_a = 0.7$ mg/s, \blacksquare — $\dot{m}_a = 0.8$ mg/s, \blacktriangle — $\dot{m}_a = 0.9$ mg/s. Стенд ОКБ „Факел“, давление в камере $1 \cdot 10^{-4}$ mm Hg. Расход через катод $\dot{m}_k = 0.27$ mg/s.

КПД и удельного импульса P_{sp} от суммарной мощности N_Σ . Из этого рисунка видно, что при расходе ксенона $\dot{m}_a = 0.7$ mg/s и напряжении 210 V суммарная мощность не превышает 150 W, при этом КПД равен $\geq 41\%$, удельный импульс достигает значения $P_{sp} = 1370$ s, тяга равна 9.4 mN. Другим режимом с мощностью $N_\Sigma = 150$ W является режим с расходом 0.8 mg/s, КПД $\approx 40\%$, $P_{sp} = 1250$ s, $F = 9.7$ mN, $U_p = 190$ V.

Важным параметром СПД является расходимость истекающей струи, которая определяется телесным углом, в который попадает 90%

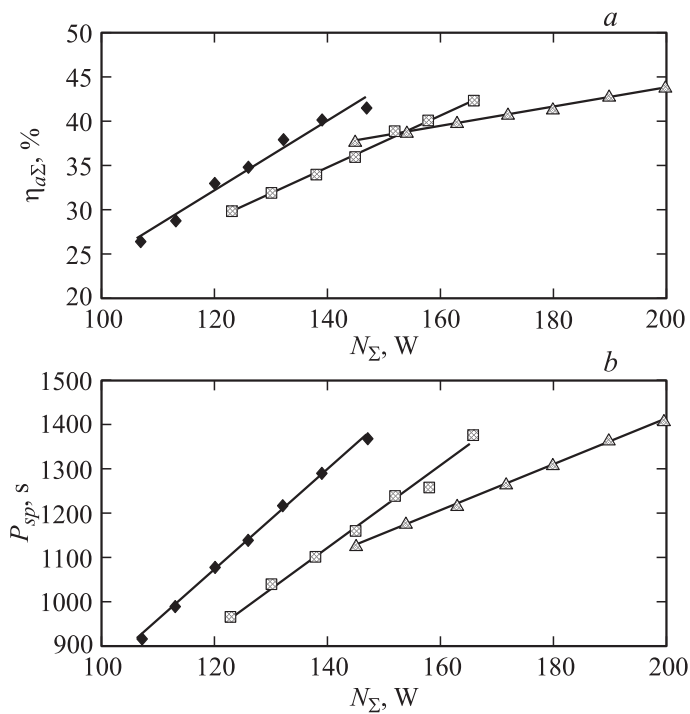


Рис. 3. Зависимость тягового КПД (а) и удельного импульса (b) α -40 от мощности для разных расходов ксенона: \blacklozenge — $\dot{m}_a = 0.7$ mg/s, \blacksquare — $\dot{m}_a = 0.8$ mg/s, \blacktriangle — $\dot{m}_a = 0.9$ mg/s.

направленного потока ионов. Для классических моделей М-70 и СПД-100 полуугол расходимости составляет $\pm 45^\circ$.

Для определения расходимости модели α -40 были сняты профили направленного ионного тока на двойной зонд. В результате обработки этих кривых был получен полуугол расходимости, равный $\pm 25^\circ$, который существенно меньше, чем у классических моделей. Уменьшение расходимости струи у СПД типа АТОН, к разновидности которого относится α -40, объясняется смещением „центра тяжести“ зоны ионизации в глубь канала. Это реализовано с помощью буферного объема, где происходит изотропизация нейтральных атомов, и создания

фокусирующей геометрии силовых линий магнитного поля в канале. Следует отметить, что при уменьшении угла расходимости струи возможно увеличение ширины поясков эрозии как на наружном, так и на внутреннем канале разрядной камеры. Это означает, что, возможно, расходимость струи влияет на ресурс двигателя.

По критериям ОКБ „Факел“ ресурс определяется временем непрерывной работы двигателя, при котором толщина изоляторов на срезе становится равной нулю. Для расчета толщины стенок изолятора по данному ресурсу необходимо определить скорость эрозии на срезе в радиальном направлении. Были проведены кратковременные ресурсные испытания α -40, работающей в режиме $U_p = 210$ V, $\dot{m}_a = 0.7$ mg/s при вкладываемой мощности $N_\Sigma \approx 150$ W в течение 50 h. Эксперименты показали, что средняя скорость эрозии на срезе α -40 для внутренней стенки составила $3 \mu\text{m/h}$, наружной — $2.25 \mu\text{m/h}$. По этим данным, используя логарифмическую аппроксимацию, было получено, что для ресурса 2500 h толщина внутренней керамики должна составлять 2.9 mm, наружной — 2.2 mm.

Таким образом, эксперименты показали, что эффективность работы СПД малой мощности, разработанного в МГТУ МИРЭА, и его прогнозируемый ресурс превосходят известные аналоги.

Работа выполнена при поддержке ФЦП „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“ на 2009–2013 годы в рамках соглашения № 14.В37.21.1840 с Минобрнауки РФ.

Список литературы

- [1] Горшков О.А., Муравлёв В.А., Шагайда А.А. Холловские и ионные плазменные двигатели для космических аппаратов / Под ред. академика РАН А.С. Коротеева. М.: Машиностроение, 2008. С. 31–42, 184–189.
- [2] Козубский К.Н., Мурашко В.М., Рылов Ю.П. и др. // Физика плазмы. 2003. Т. 29. № 3. С. 277–292.
- [3] Бугров Г.Э., Десятков А.В., Козинцева М.В., Липатов А.С. // Космонавтика и ракетостроение. 2008. Т. 3(52). С. 69–74.
- [4] Беликов М.Б., Горшков О.А., Дышлок Е.Н. и др. // Космонавтика и ракетостроение. 2008. Т. 3(52). С. 131–141.
- [5] Bugrova A.I., Desiatskov A.V., Kaufman H.R. et al. // 27th International Electronic Propulsion Conference. 2001. IEPС-2001-344.

- [6] *Polk J.* // 30th International Electronic Propulsion Conference. Florence, Italy, 2007. IEPC-2007-368.
- [7] *Polzin K.A., Markusie T.E., Stanoev B.J.* et al. // 29th International Electronic Propulsion Conference. 2005. IEPC-2005-011.
- [8] *Biagioni L., Cesari U., Saverdi M.* // 41th Joint Propulsion Conference. 2005. AIAA-2005-3875.
- [9] *Tahara H., Fujioka T., Kitano T.* et al. // 28th International Electronic Propulsion Conference. 2003. IEPC-2003-015.
- [10] *Бугрова А.И., Масленников Н.А., Морозов А.И.* // ЖТФ. 1991. Т. 61. В. 6. С. 45–51.
- [11] *Бугрова А.И., Десятков А.В., Липатов А.С.* и др. // Физика плазмы. 2010. Т. 36. № 4. С. 395–400.
- [12] *Бугрова А.И., Морозов А.И., Евтихийев Н.Н.* и др. Плазменный ускоритель с замкнутым дрейфом электронов: Патент РФ № 2139647. 1999.
- [13] *Бугрова А.И., Липатов А.С., Морозов А.И.* // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. В. 21. С. 87–94.