

УДК 621.455.32

Я. Н. КУЛЕША, М. Ю. ТИТОВ, А. В. ЛОЯН

Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Украина

РАЗРАБОТКА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТАЦИОНАРНОГО ПЛАЗМЕННОГО ДВИГАТЕЛЯ МОЩНОСТЬЮ 200 ВТ

Данная публикация посвящена разработке и экспериментальному исследованию стационарного плазменного двигателя мощностью 200 Вт. Представлены описание численной модели магнитной системы и результаты расчета магнитной системы с использованием ряда критериев оптимальности. Описана конструкция двигателя и технология сборки магнитной системы, указаны применяемые материалы. Приведены вольт-амперные характеристики двигателя, полученные на различных режимах работы по разрядному напряжению и расходу газа. Показана зависимость оптимального тока катушек от разрядного напряжения и расхода газа. Приведен способ оценки температуры по сопротивлению катушек двигателя.

Ключевые слова: стационарный плазменный двигатель, магнитная система, численный расчет, конструкция, испытания.

Введение

В настоящее время все чаще в качестве движущей силы в малых космических аппаратах (МКА) с массой ~100 кг, используемых для решения специализированных задач метеорологии, картографии, навигации, телекоммуникации, обеспечения связи и т. д., используют электроракетную двигательную установку (ЭРДУ) на основе стационарного плазменного двигателя (СПД). СПД используется в качестве двигателя для довыведения космических аппаратов на рабочую орбиту, корректировки параметров орбиты, а также для увода аппаратов в случае их неисправности или окончания миссии. В данный момент создание спутников идет по пути уменьшения их веса, габаритов и, соответственно, энерговооруженности, что ведет к необходимости разработки двигателей с малой потребляемой мощностью (до 200 ... 300 Вт).

Современные СПД, рассчитанные для работы при мощностях до 300 Вт, имеют низкий КПД по сравнению с более мощными двигателями – 20...30% против 40...60%. По этой причине актуальным направлением является разработка СПД мощностью 200 Вт с улучшенными интегральными параметрами.

Целью данной работы является разработка и экспериментальное исследование стационарного плазменного двигателя номинальной мощностью 200 Вт.

Результаты проведенной работы представлены следующим образом:

- выбор геометрических размеров двигателя;

- расчет магнитной системы двигателя;
- проектирование конструкции;
- испытания двигателя.

1. Выбор геометрических размеров

Основные геометрические параметры разрабатываемого двигателя были выбраны на базе существующих моделей двигателей мощностью до 300 Вт, таких как α -40 и F-200 АТОН («МГТУ МИРЭА») [1, 2], СПД-40 («НИИПМЭ МАИ») [3], ПлаС-34 (ОКБ «Факел») [1–4]. В табл. 1 приведены следующие основные геометрические параметры двигателей-прототипов: наружный диаметр ускорительного канала (УК) – D_k , ширина УК – B_k , длина УК – L_k , а также габаритные размеры – $L \times D$ (длина и диаметр).

Таблица 1
Линейные размеры существующих двигателей

Двигатель	D_k , мм	B_k , мм	L_k , мм	$L \times D$, мм
α -40	38	12	19	36 x 57
F-200 АТОН	38	–	–	–
СПД-40	40	7,55	15	50 x 84
ПлаС-34	40	9,5	–	–
СПД-40М1	39	7,75	16	64 x 86

Для двигателя была выбрана классическая схема построения магнитной системы – четыре внеш-

них катушки и одна внутренняя. Двигатель получил название СПД-40М1. Схема двигателя (без катода) показана на рис. 1.

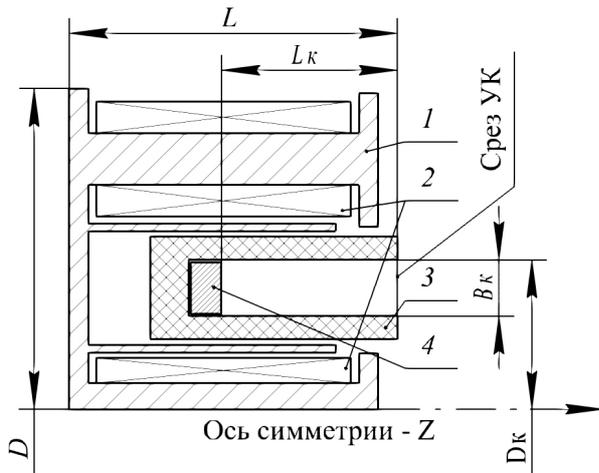


Рис. 1. Схема анодного блока двигателя СПД-40М1:
1 – магнитопровод; 2 – катушки намагничивания;
3 – керамический изолятор;
4 – анод-газораспределитель.

2. Расчет магнитной системы

Эффективность работы двигателя зависит от правильно сконструированной МС [5], поэтому расчету МС уделено наибольшее внимание.

Расчет магнитной системы СПД-40М1 проводился методом конечных элементов в пакете ANSYS Electromagnetics Suite 17,2 Maxwell 2D. Плоская расчетная модель была выбрана из-за осесимметричности двигателя. Расчет сводился к подбору необходимого количества ампер-витков, обеспечивающих необходимое значение индукции магнитного поля в ускорительном канале двигателя, а также размеров элементов магнитной системы. Для обеспечения наилучших выходных характеристик при разработке МС использовались следующие критерии [6]:

- максимальное значение радиальной составляющей магнитной индукции $B_{r\max}$ на срединной линии УК должно составлять не менее 25 мТл;
- продольное положение сечения, в котором наблюдается $B_{r\max}$, должно быть максимально смещено в направлении среза УК;
- равенство максимальных значений продольного градиента радиальной составляющей магнитной индукции dB_r/dz_{\max} вдоль внутренней и внешней стенок УК;
- отсутствие магнитного насыщения элементов магнитной системы;
- максимальное количество ампер-витков катушек намагничивания ограничивается размерами двигателя (фиксированные габаритные размеры) и

максимальной плотностью электрического тока по виткам катушки 6А/мм^2 .

Численная модель магнитной системы строилась по разработанной ранее методике, показавшей высокую точность расчета с разницей между экспериментом и расчетом менее 5% [7]. Модель состояла из нескольких элементов с разными материалами. Для опорной плиты и внешнего полюсного наконечника была использована электротехническая сталь 10880, а для сердечников и внутреннего полюсного наконечника – прецизионный магнитомягкий сплав 49КФ. Кривые намагничивания выше перечисленных материалов представлены на рис. 2. Все немагнитные элементы двигателя, а также вакуум имеют магнитную проницаемость $\mu = 1$.

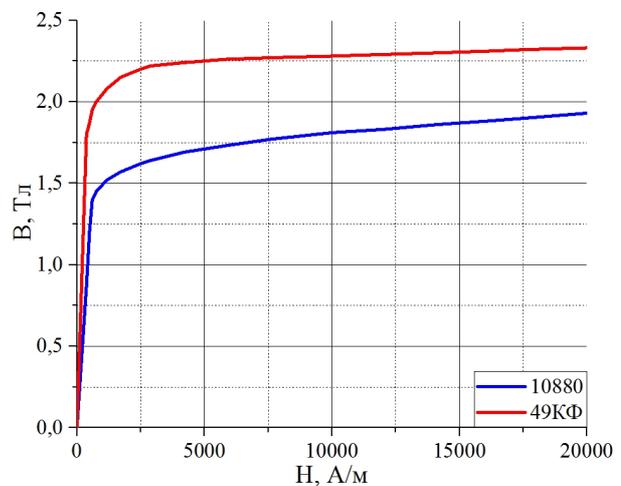


Рис. 2. Кривые намагничивания используемых магнитных материалов

Для точного расчета необходимо правильное задание граничных условий. В пакете Maxwell 2D задаются два граничных условия – условие Неймана на оси симметрии (тангенциальность вектора напряженности магнитного поля) и граничное условие типа Дирихле на внешних границах расчетной области (равенство нулю векторного произведения нормали к поверхности и векторного магнитного потенциала). Границы расчетной области были определены экспериментально, так что их удаление от магнитной системы не приводило к изменению результатов расчета более чем в 2 – 3 %.

Известно, что размеры конечного элемента (КЭ) существенно влияют на результаты расчета. Оптимальный размер КЭ определен методом последовательного уменьшения размера КЭ. По рис. 3 видно, что начиная с 1 мм, расчетное значение $B_{r\max}$, взятое на срединной линии УК, выходит на «полку», то есть размер КЭ перестаёт влиять на результат расчета. Таким образом было определено, что максимальный размер КЭ должен составлять не более 1 мм.

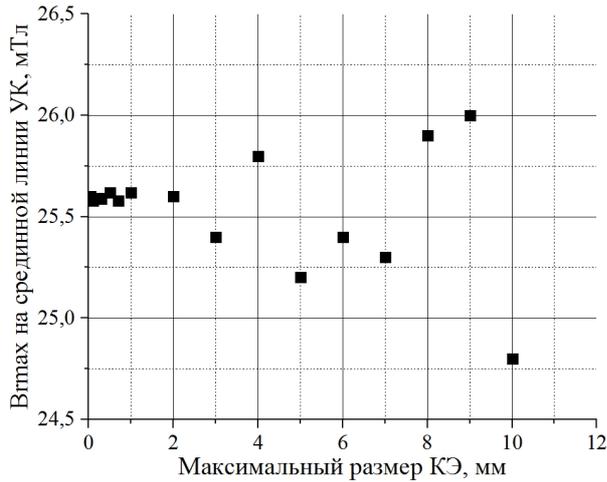


Рис. 3. Зависимость $B_{g_{max}}$ от размера КЭ

Результатами расчета являлось распределение индукции магнитного поля в усилительном канале и по элементам МС. На рис. 4 приведены достигнутые распределения B_g вдоль внутренней стенки, срединной линии и наружной стенки УК. По рисунку видно, что максимальное значение индукции магнитного поля вдоль срединной линии равно 25 мТл. Данное значение было получено при количестве ампервитков, равное 330 на каждой из катушек и плотности тока – 6 А/мм². Продольное положение точек с $B_{g_{max}}$ наблюдается как раз в сечении среза УК. На рис. 4 приведено распределение продольного градиента радиальной составляющей индукции магнитного поля dB_r/dz вдоль внутренней и внешней стенок УК. Различия между dB_r/dz_{max} вдоль внутренней и наружной стенок составляют 4,5 %.

Распределение магнитной индукции по элементам конструкции магнитной системы приведено на рис. 6, по которому видно, что только внутренний сердечник близок к магнитному насыщению ($B = 2,2$ мТл, $B_{насыщ} = 2,3$ мТл). Остальные элементы

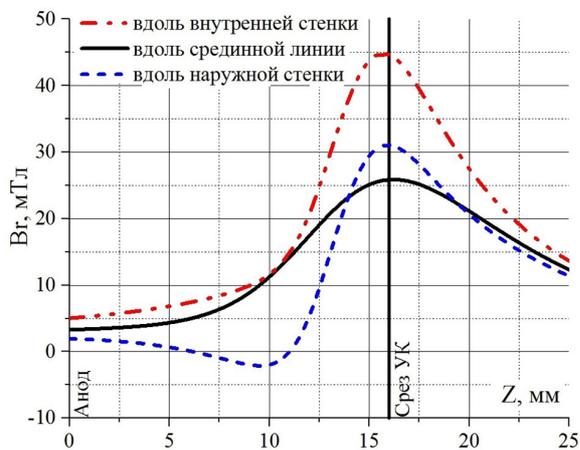


Рис. 4. Распределения B_g в УК СПД

МС находятся вне насыщения. Это позволяет говорить, что поля рассеивания магнитного поля будут незначительными.

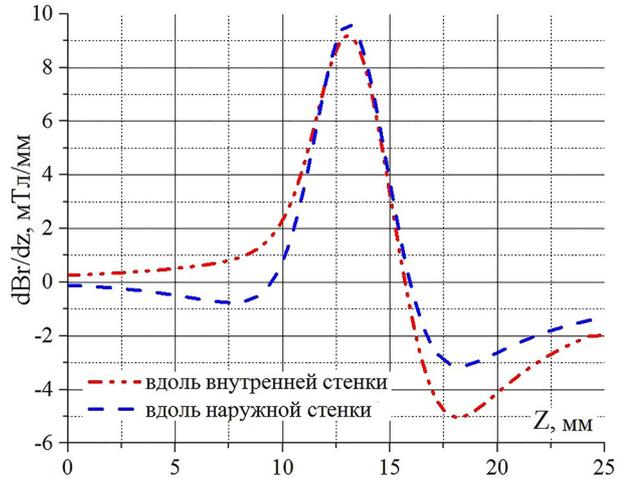


Рис. 5. Распределение dB_r/dz в УК СПД

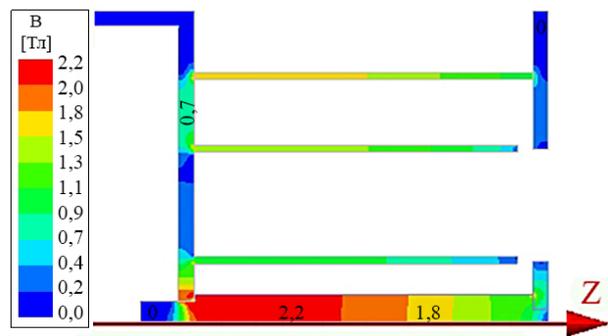


Рис. 6. Распределение индукции магнитного поля по конструкции магнитной системы СПД

На рис. 7 приведена конфигурация силовых линий магнитного поля. Информация, которая может быть взята из рисунка является качественной, т.к. неоднократно в различных публикациях показана вторичность конфигурации силовых линий, как критерия оптимальности МС двигателя [8].

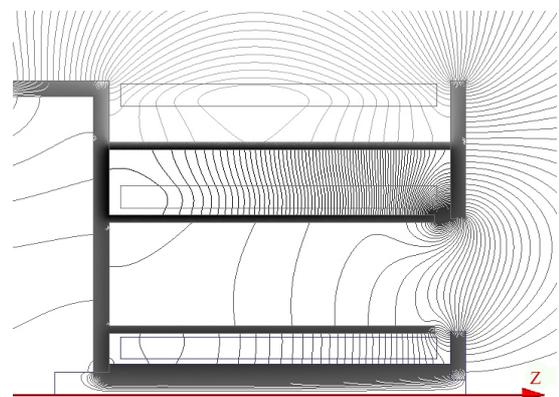


Рис. 7. Конфигурация СМЛ

3. Проектирование конструкции СПД

При проектировании конструкции не учитывалось требование по механической прочности двигателя.

Магнитопроводящая часть СПД, состоящая из опорной плиты, сердечников и полюсных наконечников является основанием, на которое осуществляется дальнейшая навеска остальных элементов двигателя. УК состоит из алюмоборнитридного (АБН) изолятора и анода-газораспределителя. При сборке двигателя использовались разборные и неразборные соединения. Так, опорная плита и сердечники соединялись пайкой в вакууме. В качестве припоя использовалась бескислородная медь. Остальные части, собирались при помощи резьбового крепежа. Схема магнитной системы с указанием соединений представлена на рис. 8.

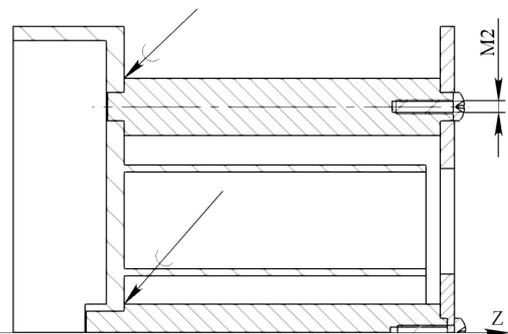


Рис. 8. Схема магнитной системы с обозначением видов соединений

Применяемый анод является двухполосным и изготовлен из титана. Несколько полостей используется для выравнивания давления по азимуту и, соответственно, обеспечения более равномерной подачи расхода газа в канал двигателя. Анод крепился с помощью трех шпилек к керамическому изолятору ГРК. Газ поступал через одну из шпилек, являющейся полый. Схема анода изображена на рис. 9.

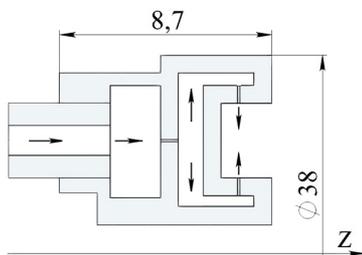


Рис. 9. Схема анода-газораспределителя

Для намотки катушек намагничивания использовался провод марки ПОЖ. Провод наматывался на каркасы, изготовленные из сплава Д16Т. Для повышения электрической прочности каркасы были покрыты защитным слоем методом микродугового

оксидирования (МДО) толщиной 50 мкм. Снаружи на катушки одевались защитные кожухи из нержавеющей фольги. Это необходимо для предотвращения разрушения изоляции обмоток.

При испытаниях использовался безнакальный полый катод, эффективно работающий при токах от 0,5 до 1,5 А.

Фотография двигателя представлена на рис. 10.



Рис. 10. СПД-40М1

4. Испытания двигателя

Исследование работы двигателя проводилось на экспериментальной установке, подробное описание которой приведено в [9].

Измерение вольт-амперных характеристик (ВАХ) стационарного плазменного двигателя проводилось при различных анодных расходах ксенона \dot{M}_a и фиксированном катодном – 0,15 мг/с (рис. 11). Ток разряда изменялся от 0,4 до 1,2 А. Было замечено, что с повышением напряжения разряда U_d ток разряда I_d незначительно растет. При этом сами вольт-амперные характеристики достаточно линейны, что характерно для всего класса стационарных плазменных двигателей. [1, 5].

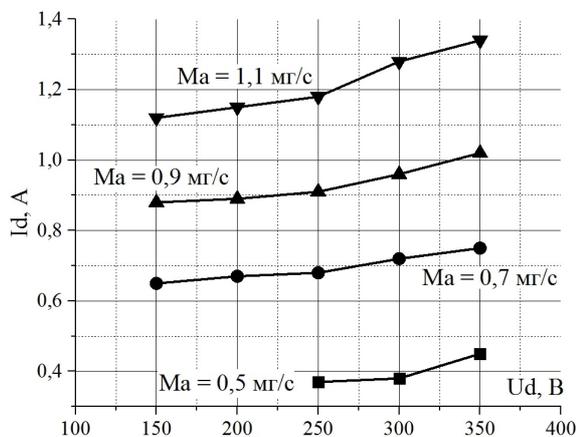


Рис. 11. Вольт-амперные характеристики СПД-40М1

Вольт-амперные характеристики измерялись при таких значениях тока в катушках намагничивания (I_{mc}), при которых обеспечивался минимум разрядного тока. Катушки были соединены последовательно, поэтому ток во внешних катушках был равен току во внутренней. На рис. 12 приведена зависимость оптимального тока катушек намагничивания от разрядного напряжения и анодного массового расхода. По рисунку видно, что при увеличении \dot{M}_a и U_d оптимальное значение разрядного тока увеличивается. Испытания проводились с верхним ограничением по току в катушках, равному 6 А, т.к. это значение является предельным для данного сечения проводов катушек. Однако, кратковременные исследования показали, что действительный оптимум разрядного тока при разрядных напряжениях $U_d > 300$ В находится на уровне 8 А в катушках. В частности, это может объяснять наличие наклона вольт-амперных характеристик, приведенных ранее.

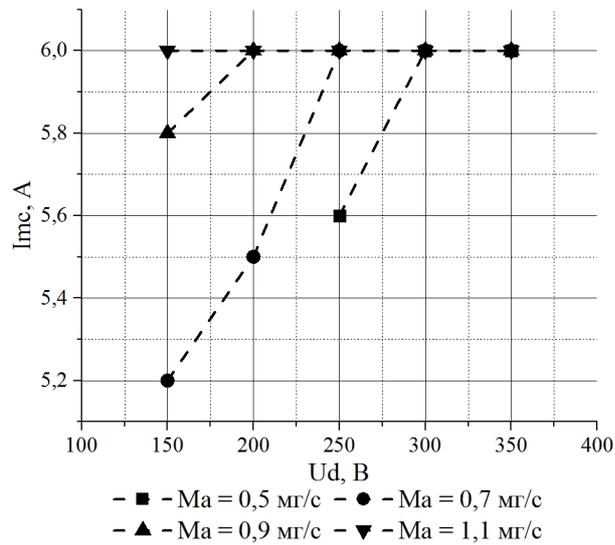


Рис. 12. Зависимость тока катушек от разрядного напряжения

Отдельно для оценки температуры элементов двигателя во время его работы была найдена зависимость сопротивления катушек от температуры. Суть эксперимента сводилась к нагреванию катушки в вакуумном сушильном шкафу SPT-200 в диапазоне температур 20...250 °С и определения зависимости сопротивления от температуры. Для повышения точности определения температуры использовалась хромель-копелевая термопара. Дальнейшее нахождение обратной зависимости температуры от сопротивления (рис. 13) позволило оценить температуру катушек двигателя во время его работы. Температуры внутренней и внешних катушек при номинальном режиме работы 200 Вт составили 310 и 250 °С соответственно.

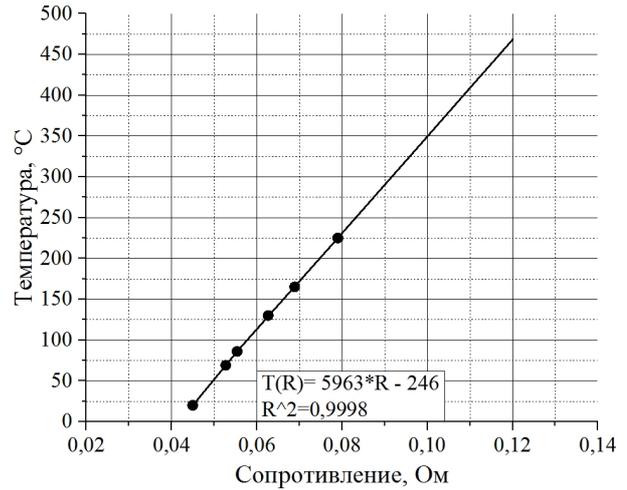


Рис. 13. Зависимость температуры от сопротивления магнитной катушки СПД-40М1

Выводы

В данной работе приведены результаты проектирования и экспериментального исследования стационарного плазменного двигателя мощностью 200 Вт.

Был проведен расчет магнитной системы с использованием ряда критериев, в результате которого получено следующее:

- уровень индукции магнитного поля в ускорительном канале двигателя 25 мТл;
- значения $B_{r_{max}}$ находятся в плоскости среза УК;
- различие максимальных значений продольного градиента радиальной составляющей магнитной индукции dBr/dz_{max} вдоль внутренней и внешней стенок УК составило 4,5%;
- отсутствует насыщения элементов магнитной системы.

Спроектирована конструкция и проработаны элементы двигателя.

Проведены испытания двигателя в результате которых получены вольт-амперные характеристики, определены оптимальные значения токов катушек. Эти значения токов в катушках лежат выше допустимых для данного типа проводника обмотки, что является помехой для обеспечения оптимального магнитного поля двигателя. Для увеличения магнитного поля необходимо увеличение количества ампер-витков.

Проведена оценка температуры катушек двигателя. Максимальное значение составило 310 °С, что является допустимым для используемой марки провода.

В дальнейшем планируется продолжение работ по исследованию СПД мощностью 200 Вт. Будут

измерены тяговые характеристики, проведены расчеты удельного импульса и КПД двигателя, спрогнозирован ресурса. Необходимым так же является внесение изменений в конструкцию МС двигателя с целью повышения количества ампер-витков в катушках намагничивания.

Литература

1. Стационарный плазменный двигатель малой мощности [Текст] / Г. Э. Бугров, В. А. Давыдов, А. В. Десятков и др. // Наука и образование. – 2013. – № 10. – doi: 10.7463/1013.0640392.

2. Исследование характеристик СПД малой мощности, работающих на криптоне и ксеноне [Текст] / П. Г. Смирнов, Д. П. Грдличко, В. П. Ким и др. // Авиация и космонавтика : тез. докл. 15-ой Международ. конф., 14-18 ноября 2016 г. – М., 2016. – С. 321.

3. Investigation of a Low-power Thruster on Krypton Propellant [Text] / P. A. Saevets, V. P. Kim, D. P. Grdlichko et al // Procedia Engineering, 2017. – vol. 185. – P. 85-90.

4. Гопанчук, В. В. Создание плазменных двигателей малой мощности для микроспутников [Текст] / В. В. Гопанчук, М. Ю. Потапенко // Авиационно-космическая техника и технология. – 2015. – № 4 (11). – С. 40-49.

5. Потапенко, М. Ю. Разработка и исследование стационарного плазменного двигателя с полым магнитным анодом малой мощности [Электронный ресурс] / М. Ю. Потапенко. – Режим доступа: <http://trudymai.ru/upload/iblock/5e1/5e162e5037b8073c122cd26403cfef05.pdf>. – 25.04.2014.

6. Титов, М. Ю. Оптимизация магнитной системы СПД-70 путем максимизации градиента индукции магнитного поля [Текст] / М. Ю. Титов, А. В. Лоян // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов : сб. науч. тр. – 2017. – Вып. 1 (89). – С. 83-95.

7. Численное моделирование магнитной системы Холловского двигателя мощностью до 100 Вт [Текст] / М. Ю. Титов, А. В. Лоян, В. А. Подгорный и др. // Вестник двигателестроения. – 2010. – № 2. – С. 73–78.

8. Титов, М. Ю. Исследование связей свойств зоны ионизации и ускорения с магнитным полем в ускорительном канале стационарного плазменного двигателя [Текст] / М. Ю. Титов, А. В. Лоян // Авиационно-космическая техника и технология. – 2017. – № 3 (138). – С. 112-118.

9. Титов, М. Ю. Экспериментальный стенд и оборудование для исследования параметров плазмы в канале стационарного плазменного двигателя [Текст] / М. Ю. Титов // Авиационно-космическая техника и технология. – 2015. – № 7 (124). – С. 121-125.

References

1. Bugrova, A. I., Bugrov, G. E., Davydov, V. A., Desyatskov, A. V., Kozintseva, M. V., Safronov, A. A., Smirnov, P. G., Kharchevnikov, V. K., Shaposhnikov, M. I., Pil'nikov, A. V. Stacionarnyi plazmenniy dvigatel' maloi moshchnosti [Stationary low-power plasma thruster]. *Nauka i obrazovanie*, 2013, no. 10. doi: 10.7463/1013.0640392.

2. Smirnov, P. G., Grdlichko, D. P., Kim, V. P., Merkur'ev, D. V. Issledovanie kharakteristik SPD maloi moshchnosti, rabotayushchikh na kriptide i ksenone [A study of the characteristics of stationary low-power plasma thruster operating on krypton and xenon]. *Aviatsiya i kosmonavtika : tez. dokl. 15-oi Mezhdunar. konf.* [Abstracts of the 15th international conference]. Moscow, 2016, pp. 321.

3. Saevets, P. A., Kim, V. P., Grdlichko, D. P., Smirnov, P. G. Investigation of a Low-power Thruster on Krypton Propellant. *Procedia Engineering*. 2017, vol. 185, pp. 85-90.

4. Gopanchuk, V. V., Potapenko, M. Yu. Sozdanie plazmennyykh dvigatelei maloi moshchnosti dlya mikrosputnikov [Development of low-power plasma thrusters for microsatellites]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2015, no. 4 (11), pp. 40-49.

5. Potapenko, M. Yu. *Razrabotka i issledovanie stacionarnogo plazmennogo dvigatelja s polym magnitnym anodom maloj moshchnosti* [Development and investigation of a stationary plasma thruster with a hollow magnetic anode of low power]. Available at : <http://trudymai.ru/upload/iblock/5e1/5e162e5037b8073c122cd26403cfef05.pdf> (accessed 25.04.2014).

6. Titov, M. Yu., Loyan, A. V. Optimizacija magnitnoj sistemy SPD-70 putem maksimizacii gradienta indukcii magnitnogo polja [Optimization of the magnetic system of SPT-70 by maximizing the gradient of magnetic field induction]. *Voprosy proektirovaniya i proizvodstva konstrukcij letatel'nyh apparatov*. 2017, no. 1 (89), pp. 83-95.

7. Titov, M. Yu., Loyan, A. V. Podgorniy, V. A., Fedotenko, V.A., Numerical modeling of magnetic system for hall thruster with power up to 100 W. *Vestnik dvigatelestroeniya*, 2010, no. 2, pp. 73–78.

8. Titov, M. Yu., Loyan, A. V. Issledovanie svyazey svoystv zony ionizacii i uskoreniya s magnitnym polem v uskoritel'nom kanale stacionarnogo plazmennogo dvigatelja [Investigation of the relationships between the properties of the ionization zone and acceleration with a magnetic field in the accelerator channel of a stationary plasma thruster]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2017, no. 3 (138), pp. 112-118.

9. Titov, M. Yu. Eksperimental'nyy stend i oborudovanie dlja issledovaniya parametrov plazmy v kanale stacionarnogo plazmennogo dvigatelja [Experimental stand and equipment for investigation of plasma parameters inside SPT channel]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2015, no. 7 (124), pp. 121-125.

Поступила в редакцию 20.04.2017, рассмотрена на редколлегии 12.06.2017

Рецензент: д-р техн. наук, ст. науч. сотр., проф. каф. теоретической механики, машиноведения и роботомеханических систем Ю. А. Сысоев, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

РОЗРОБКА ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ СТАЦІОНАРНОГО ПЛАЗМОВОГО ДВИГУНА ПОТУЖНІСТЮ 200 ВТ

Я. М. Кулеша, М. Ю. Тітов, А. В. Лоян

Дана публікація присвячена розробці та експериментальному дослідженню стаціонарного плазми-ного двигуна потужністю 200 Вт. Представлені опис чисельної моделі магнітної системи та результати розрахунку магнітної системи з використання ряду критеріїв оптимальності. Описана конструкція двигуна та технологія збірки магнітної системи, вказані вживані матеріали. Наведено вольт-амперні характеристики двигуна, отримані на різних режимах роботи по розрядній напрузі та витратам газу. Показана залежність оптимального струму котушок від розрядної напруги та витрат газу. Наведено спосіб оцінки температури двигуна по опору котушок.

Ключові слова: стаціонарний плазмовий двигун, магнітна система, чисельний розрахунок, конструкція, випробування.

DEVELOPMENT AND EXPERIMENTAL RESEARCH OF A STATIONARY PLASMA THRUSTER WITH A POWER OF 200 W

Ya. N. Kulesha, M. Yu. Titov, A. V. Loyan

This publication is devoted to the development and experimental study of a stationary plasma thruster with a power of 200 W. The description of the numerical model of the magnetic system and the results of calculating the magnetic system using a number of optimality criteria are presented. The design of the engine and the technology of assembling the magnetic system are described, the materials used are indicated. Volt-ampere characteristics of the engine obtained at various operating modes for the discharge voltage and gas flow are given. The dependence of the optimum coil current on the discharge voltage and gas flow is shown. The way of an estimation of temperature on resistance of coils of the thruster.

Keywords: Stationary plasma thruster, magnetic system, numerical simulation, design, testing.

Кулеша Ярослав Николаевич – студент факультета самолетостроения Национального аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: yaroslav.kulesha@gmail.com.

Тітов Максим Юрьевич – мл. науч. сотр. каф. 402 Национального аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: m.y.titov@ukr.net.

Лоян Андрей Витальевич – канд. техн. наук, ст. науч. сотр. кафедры 402 Национального аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: a.loyan@khai.edu.

Kulesha Yaroslav Nikolaevich –student, Aircraft building faculty, National Aerospace University named after N. Ye. Zhukovsky “KhAI”, Kharkov, Ukraine, e-mail: yaroslav.kulesha@gmail.com.

Titov Maksym Yurevich – researcher, 402 department, National Aerospace University named after N. Ye. Zhukovsky “KhAI”, Kharkov, Ukraine, e-mail: m.y.titov@ukr.net.

Loyan Andriy Vitalevich – candidate of Technical Science, senior staff scientist, 402 department, National Aerospace University named after N. Ye. Zhukovsky “KhAI”, Kharkov, Ukraine, e-mail:a.loyan@khai.edu.