

УДК 533.9.07

Т.А. МАКСИМЕНКО

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", Украина

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ СПД МАЛОЙ МОЩНОСТИ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В РАЗРЯДНОЙ КАМЕРЕ

Рассмотрена проблема влияния теплового состояния магнитопровода стационарного плазменного двигателя малой мощности на распределение магнитного поля в разрядной камере. Приведены результаты испытаний серии двигателей. Показана возможность повышения тягового КПД за счет улучшения магнитного поля при учете теплового состояния двигателя.

стационарный плазменный двигатель, магнитопровод, тепловое состояние, конечно-элементная модель

Введение

Общая постановка проблемы и ее связь с научно-практическими задачами. В настоящее время имеет место миниатюризация и увеличение надежности электроники аппаратуры спутниковых систем. В связи с этим значительно расширился круг задач решаемых при помощи микроспутников. Однако энерговооруженность подобных космических летательных аппаратов (КЛА) весьма ограничена, из-за чего еще не решена проблема разработки систем активной коррекции и поддержания их орбиты ввиду отсутствия надежных и эффективных двигателей. Решение данной проблемы позволит значительно увеличить период активного существования малых космических летательных аппаратов. Эта проблема может быть решена путем создания новых холловских двигателей (ХД) с низким уровнем энергопотребления, учитывая то, что ХД мощностью 1,5-3 кВт уже успели себя хорошо зарекомендовать.

Обзор публикаций и анализ нерешенных проблем. На сегодняшний день большой интерес проявляется к стационарным плазменным двигателям малой мощности (МСПД) [1 – 3]. Снижение уровня потребляемой мощности ниже 100 Вт и существенные ограничения, накладываемые на массогабаритные параметры ДУ, серьезно усложняют задачу раз-

работки двигателя в целом и в особенности его магнитной системы. С целью повышения тягового КПД СПД большое внимание уделялось формированию оптимального магнитного поля (МП) в разрядном канале (РК) двигателя [4 – 6]. Также отмечалась повышенная теплонапряженность МСПД [7], однако до сих пор она никак не учитывалась при исследовании распределения магнитного поля. В связи с тем, что материал магнитопровода изменяет свои магнитные параметры (магнитная проницаемость, индукция насыщения) при изменении температуры, можно предположить, что с их изменением будут изменяться параметры магнитного поля в РК и соответственно эффективность двигателя. Таким образом возникает необходимость более подробного исследования данного влияния.

Целью исследований является выявление влияния теплового состояния магнитопровода стационарного плазменного двигателя малой мощности на распределение магнитного поля в разрядной камере для повышения тягового КПД двигателя.

Результаты исследований

В Национальном аэрокосмическом университете им. Н.Е. Жуковского «ХАИ» на каф. 402 была разработана, изготовлена и испытана серия двигателей СПД-20М. Результаты испытаний одной из первых модификаций показали, что двигатель при потреб-

ляемой мощности менее 100 Вт выдает следующие параметры: тяга – 4мН, удельный импульс – 1300с, КПД – 25%.

В ходе испытаний МСПД наряду с тяговыми и разрядными характеристиками было проведено исследование теплового состояния конструкции двигателя (рис. 1).

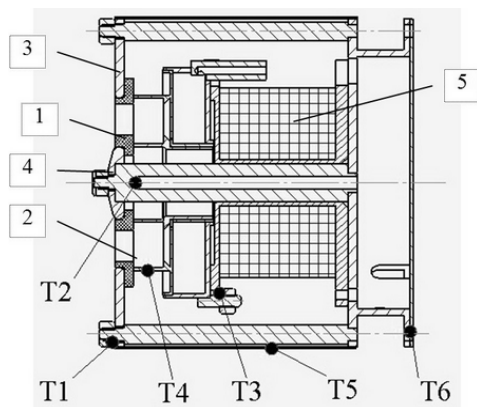


Рис. 1. Схема МСПД, размещение термопар

С момента запуска двигателя до его выхода на стационарный тепловой режим при помощи термопар (ТХА) измерялась температура в следующих узлах двигателя:

- 1) тыльный торец магнитопровода (МП),
- 2) внешний полюсный наконечник,
- 3) центральный полюсный наконечник,
- 4) магнитный экран,
- 5) шпилька крепления анода-газораспределителя,
- 6) защитный кожух.

Анализируя полученные экспериментальные данные (рис. 2), можно прийти к выводу об ограниченности экспериментального метода теплового состояния конструкции двигателя, так как нельзя получить полного распределения температурных полей и отследить все теплонапряженные участки. Для решения данной проблемы при помощи аппарата конечно элементного (КЭ) анализа было осуществлено моделирование распределения температурных полей в конструкции двигателя.

Входными данными для создания КЭ модели послужили информация о геометрических параметрах МСПД, магнитные свойства использованных материалов, условиях работы и данные, полученные в ходе испытаний.

Дискретизация всех элементов конструкции двигателя производилась плоскими осесимметричными восьмиузловыми четырехугольными КЭ. Для установления оптимальной степени дискретизации пространства и элементов конструкции был проведен ряд пробных численных экспериментов.

При решении тепловой задачи рассматривался баланс тепловых потоков. Принималось, что основное тепловыделение происходит в катушке намагничивания за счет ее резистивного нагрева (Q_1), на стенках РК и аноде за счет кинетической энергии частиц, взаимодействующих с ними (Q_2). Теплообнос происходит за счет рассеивания тепла излучением с поверхности двигателя (Q_3) и теплопроводности через элементы крепления в сопрягаемую конструкцию (Q_4).

Для начала решалась отдельная задача как определение распределения температуры по элементам двигателя с одним источником нагружения - работающей катушкой (Q_1). Была выполнена корректировка условий контакта и плотность сетки КЭ.

Тепловой поток Q_2 определялся из расчета, что некоторая часть энергии основного разряда, которая не превратилась в полезную работу (кинетическая энергия ускоренных частиц, создающих тягу) и пре-

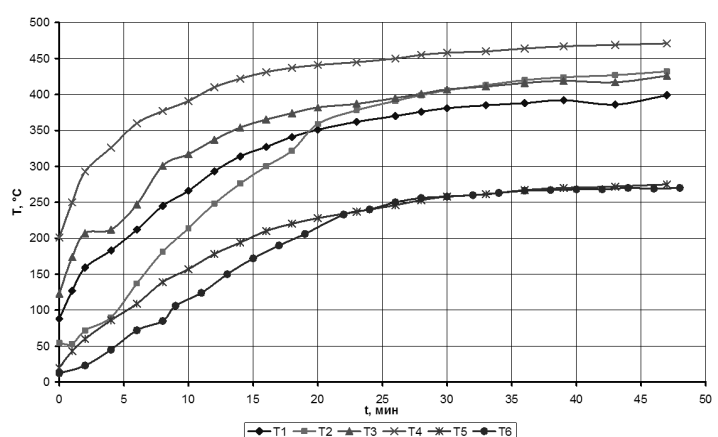


Рис. 2. Динамика изменения температуры МСПД

вращается в тепловую энергию. Остальные потери, ведущие к снижению КПД, определяются расфокусировкой струи и немонохроматичностью пучка, также прикатодным падением потенциала, неустойчивостями в разряде, затраты на ионизацию и излучение и др. С большой точностью изначально нельзя сказать каким образом энергетические потери перераспределяются между собой. Поэтому при моделировании проводилось варьирование величиной теплового потока на анод и стенки РК таким образом, чтобы сумма квадратов невязок динамических температурных характеристик, полученных при моделировании и в ходе эксперимента, составляла минимальное значение для всех узлов двигателя (рис. 3).

В итоге были получены поля распределения температуры в конструкции двигателя (рис. 4).

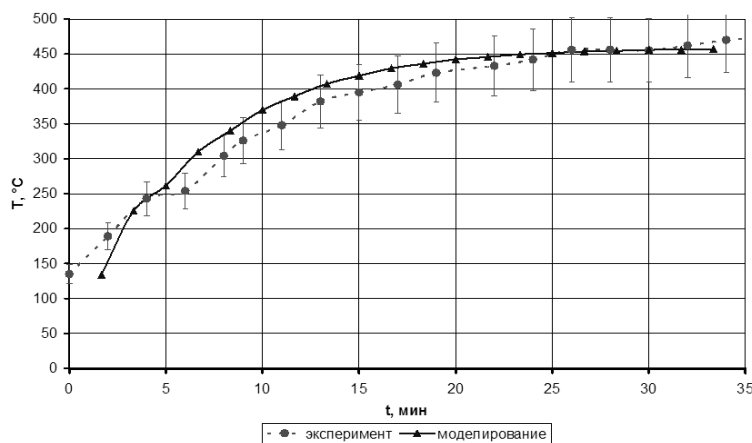


Рис. 3. Изменение температуры анода во времени (сравнение)

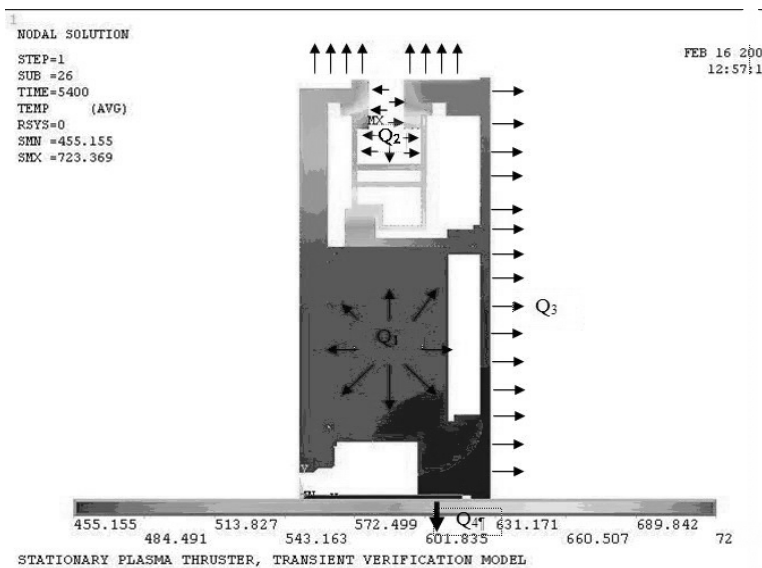


Рис. 4. Распределение температур по результатам моделирования

Исходя из полученных результатов видно, что элементы конструкции магнитопровода МСПД на стационарном режиме работы находятся в теплонапряженном состоянии. Принимая во внимание свойства магнитомягких материалов изменять свои магнитные параметры (магнитная проницаемость, индукция насыщения) при изменении температуры, можно предположить, что с их изменением будут изменяться параметры магнитного поля в РК (как по абсолютным значениям, так и по форме силовых линий).

Для проверки выдвинутого предположения было проведено моделирование МП для МСПД при условии теплового нагружения. При решении данной задачи учитывались тепловые зависимости магнитных свойств материала магнитопровода.

В результате было показано, что в зависимости от используемого ферромагнетика при описанных условиях наблюдается общее снижение значения магнитной индукции (рис. 5) вплоть до полного изменения профиля осевого распределения радиальной составляющей вектора магнитной индукции (к примеру, для АРМКО).

Из полученных результатов видно, что тепловое состояние магнитопровода в значительной мере влияет на параметры магнитного поля (максимальное значение радиальной составляющей индукции магнитного поля и на его распределение). Вплоть до полного разрушения фокусирующей конфигурации и продольного градиента радиальной составляющей индукции магнитного поля, что весьма наглядно подтверждается для случая с магнитным экраном из материала с низкой точкой Кюри (рис. 5, АРМКО).

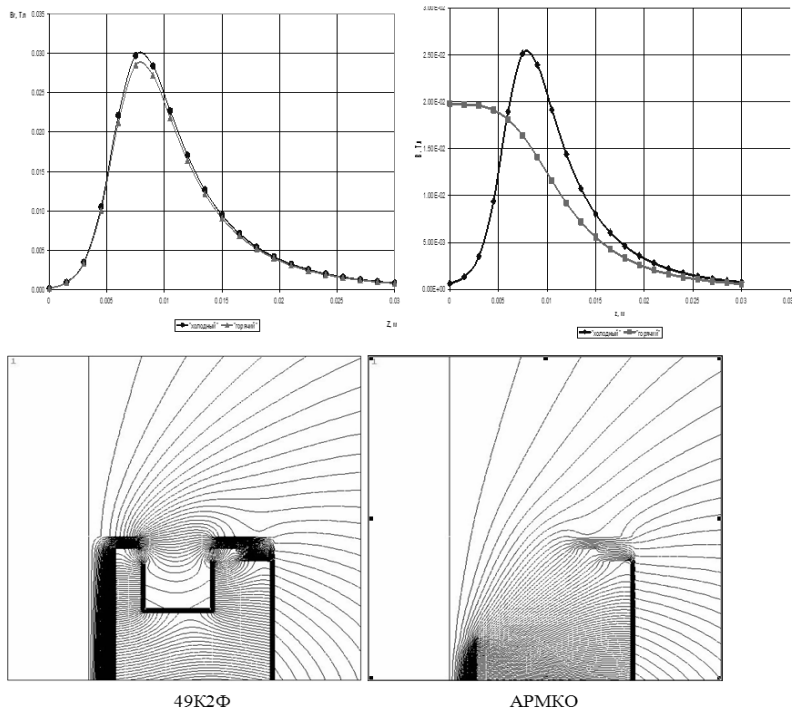


Рис. 5. Результаты моделирования распределения МП для холодной и нагретой конструкции

Учитывая данный момент и то, что параметры МП непосредственным образом влияют на эффективность двигателя, был выполнен поиск рационального решения для обеспечения повышения тягового КПД двигателя. В качестве критерия, связывающего свойства МП и эффективность двигателя, был выбран параметр G , предложенный авторами работы [6], который характеризует эффективность удержания электронов магнитным полем в зоне ионизации:

$$G = 4\pi \int_{z_1}^{z_2} \int_{r_1}^{r_2} \sqrt{1 - \frac{B(z,r)}{B_c(z,r)}} dz dr,$$

где z – осевая координата, r – радиальная координата, B – значение индукции МП в точке на определенной магнитной силовой линии, B_c – значение индукции МП в точке пересечения данной магнитной силовой линии со стенкой РК. Входными параметрами были приняты геометрические параметры магнитопровода, а также величина тепловых потоков на элементы конструкции двигателя. Для

решения задачи было необходимо экспериментальным методом уточнить значения тепловых потоков. Для чего на промежуточных этапах решения изготавливались пробные модели МСПД, при чем каждой последующей соответствовало большее значение G . После чего проводились их испытания и измерение параметров необходимых для внесения соответствующих корректив.

Результаты испытаний показали, что от модели к модели с увеличением параметра G наблюдается улучшение тяговых характеристик (рис. 6) и КПД двигателя (рис. 7).

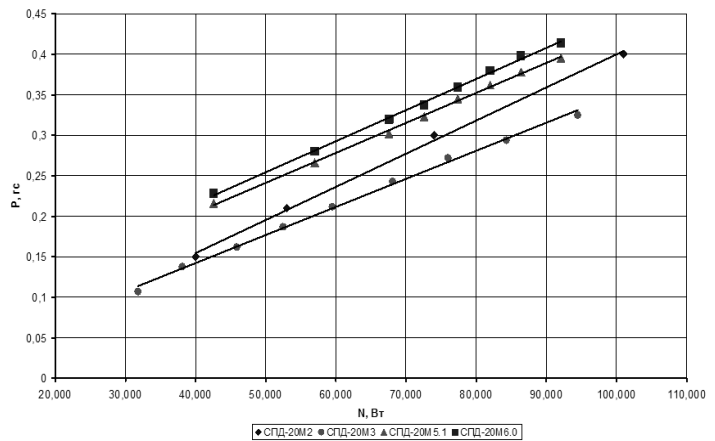


Рис. 6. Зависимость тяги от потребляемой мощности

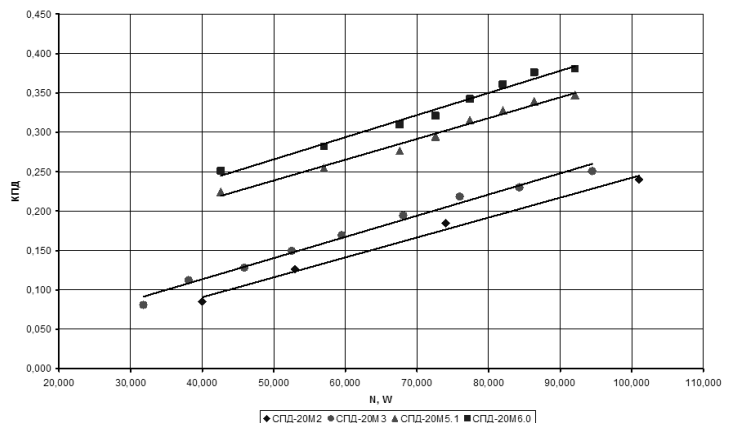


Рис. 7. Зависимость тягового КПД от потребляемой мощности

Таким образом, за счет изменения геометрии и подбора материала магнитопровода, на 4-й модели было получено повышение КПД на 15% (от 23% на начальном этапе до 38% на завершающем) при потребляемой мощности 100 Вт.

Перспективы дальнейших исследований

Полученные результаты позволяют в дальнейшем при помощи численного эксперимента создавать магнитные системы МСПД с минимальными затратами на ее изготовление. При этом удается добиться распределения магнитного поля в РК, которое обеспечивает улучшение интегральных характеристики двигателя.

В настоящее время ведется технологическая отработка отдельных узлов двигателя для создания летного варианта, на базе которого разрабатывается электрореактивная двигательная установка для коррекции и поддержания орбиты КА малого класса.

Заключение

Экспериментально-теоретическим методом исследовано влияние теплового состояния магнитопровода МСПД на распределение МП в РК. Методом конечных элементов промоделированы тепловое состояние конструкции двигателя и распределение магнитного поля. Адекватность результатов моделирования была проверена экспериментально. Показано, что с прогревом конструкции магнитопровода в зависимости от материала могут в значительной мере изменяться параметры МП в РК, что может повлечь за собой изменение параметров зоны ионизации и ускорения, повышение сквозного электронного тока, расфокусировку струи и соответственно снижение эффективности двигателя. В результате проведенной работы было промоделирова-

но распределение магнитного поля для магнитной системы СПД с учетом теплового состояния конструкции двигателя.

Автор работы приносит благодарность Лояну А.В., Кошелеву Н.Н., Степанушкину Н.П., Печенежскому И.П. за ценные замечания и обсуждение результатов. Данная работа проведена в рамках проекта УНТЦ №1936.

Литература

1. Micropropulsions for small spacecraft / M.M. Micci, A.D. Ketsdever editors. – AIAA, Washington, DC, 2000. – 320 p.
2. Khayms V., Martinez-Sanchez M. Micropropulsion for small spacecraft. Chapter 9. – AIAA, 2002.
3. Micropropulsion for small spacecraft. Chapter 10 / J. Monheiser, V. Hruba, C. Freeman, W. Connolly, B. Pote. – AIAA, 2002. – 240 p.
4. Zhurin V.V., Kaufman H.R., Robinson R.S. Plasma Sources // Sci. Technol. – 1999. – 8. – P. 1-20.
5. Стационарный плазменный ускоритель – двигатель АТОН / А.И. Морозов, А.И. Бугрова, А.В. Десятков и др. // Физика плазмы. – 1997. – Т. 23, № 7. – С. 635-645.
6. Blinov V., Gorshkov A., Shagayda A. Experimental Investigation of Magnetic Field Topology Influence on Structure of Accelerating Layer and Performance of Hall Thruster // Proceedings of the 29th International Electric Propulsion Conference, IEPC-2005-033 – Princeton University. – October 31 – November 4, 2005. – P. 133-137.
7. Ahedo E., Gallardo J.M. Scaling down hall thrusters. – IEPC-2003-104. – 88 p.

Поступила в редакцию 1.06.2007

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.И. Оранский, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”, Харьков.