

УДК 629.7.036.74

А. В. Каташов, К. Н. Козубский

**СТАЦИОНАРНЫЙ ПЛАЗМЕННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ
С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ
ДЛЯ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ**

Представлено описание стационарного плазменного двигателя с постоянными магнитами. Произведен расчет магнитного поля, создаваемого постоянными магнитами. Определена конфигурация магнитной системы двигателя.

© Каташов А. В., Козубский К. Н., 2014

Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. 2014. Вып. 10. С. 96 – 101.



This paper presents the description of a stationary plasma thruster with permanent magnets. The magnetic field generated by constant magnets is estimated, and configuration of the thruster magnetic system is defined herein.

Ключевые слова: стационарный плазменный двигатель, постоянный магнит, магнитная система, остаточная индукция, коэрцитивная сила.

Key words: stationary plasma thruster, permanent magnet, magnetic system, residual magnetic induction, coercitive force.

В настоящее время перспективным направлением в развитии космической отрасли является создание и применение малых космических аппаратов (МКА). Интерес к созданию и использованию МКА, наметившийся в последние годы как за рубежом, так и в России, объясняется их относительно низкой стоимостью, сокращением сроков разработки и изготовления, снижением риска больших финансовых потерь в случае неудачного запуска, а также удешевлением вывода на орбиту и эксплуатации таких аппаратов.

Активное внедрение МКА делает актуальной проблему создания дешевых и надежных двигательных установок (ДУ) на базе электрических ракетных двигателей (ЭРД) малой мощности, способных эффективно решать задачи управления орбитальным движением таких аппаратов.

Сейчас разработано целое семейство ЭРД, отличающихся способом ускорения рабочего тела (РТ) и режимом работы (импульсный или непрерывный). По способу ускорения РТ выделяют три класса ЭРД: с тепловым, электромагнитным и электростатическим ускорением РТ [1].

В двигателях с электромагнитным ускорением рабочее тело — квазинейтральная плазма, разгоняемая за счет электромагнитной энергии. Двигатели этого класса принято подразделять на два подкласса в зависимости от того, какое магнитное поле используется в процессе ускорения — собственное или внешнее [1].

К электромагнитным двигателям с внешним магнитным полем относятся холловские двигатели, в которых замкнутый дрейф электронов играет ключевую роль. В основе действия холловского двигателя лежит создание сильного электрического поля в плазме [1].

В одном из таких двигателей — стационарном плазменном двигателе (СПД) магнитное поле может создаваться как с помощью катушек намагничивания, так и с помощью постоянных магнитов. В последнем случае не нужны дополнительные затраты энергии на создание магнитного поля, что важно для микро-СПД малой мощности.

Работы по разработке и исследованию микро-СПД с постоянными магнитами ведутся в ОКБ «Факел», г. Калининград.

При проектировании конструкции СПД в первую очередь необходимо было спроектировать магнитную систему двигателя. С целью выбора оптимальной конфигурации магнитного поля в двигателе были произведены расчеты магнитного поля нескольких вариантов конструкции с использованием математической модели, заложенной в модуле EMAG пакета прикладных программ NISA/Display Version 17.

За прототип был взят двигатель ТЧТ-3В (Low-Power Cylindrical Hall Thruster) с постоянными магнитами, разработанный в Технологическом институте г. Осака, Япония [2]. Конструктивная схема этого двигателя представлена на рисунке 1.

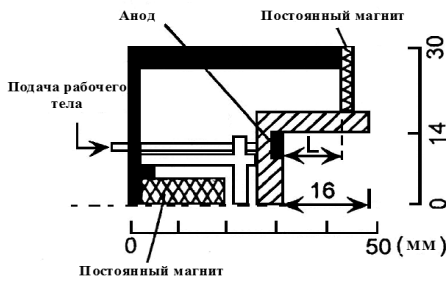


Рис. 1. Конструктивная схема двигателя ТСНТ-3В

изменении длины L (расстояние от анода до внутренней плоскости кольцеобразного постоянного магнита), которая составляла 2, 6 и 10 мм. Ввиду более высоких тяговых показателей и стабильности работы двигателя оптимальной признана длина L , равная 6 мм. При этом КПД двигателя составил 26–39% в диапазоне входной мощности 80–170 Вт при расходе рабочего тела 0,30 мг/с [2].

Расчет микро-СПД с постоянными магнитами производился с заданием средних значений магнитных свойств образцов на основе редкоземельных материалов (РЗМ): остаточная индукция $B_r = 0,92$ Тл, коэрцитивная сила $H_c = 560$ кА/м, максимальная удельная магнитная энергия $W_{\max} = 75$ кДж/м³. Максимальная удельная магнитная энергия в расчете не учитывалась, так как с целью упрощения расчета рассматривался материал с линейной кривой размагничивания, коэффициент линейности которой определялся как $\nu = H_c/B_r = 608696$ м/Гн. В качестве материала магнитных экранов и магнитопровода задавалась магнитомягкая сталь, для которой предельно допустимое значение индукции для оптимальной работы двигателя составляет 1,2 Тл (так называемая индукция насыщения B_s).

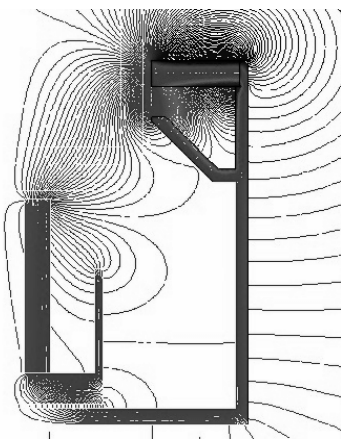


Рис. 2. Топология силовых линий магнитного поля

Разрядная камера данного двигателя имеет цилиндрическую форму. Анод располагается на расстоянии 16 мм от среза разрядной камеры. Двигатель имеет два постоянных магнита, один из которых цилиндрического вида находится в центре двигателя, а другой имеет кольцеобразную форму и состоит из шести секторных магнитов.

Огневые испытания двигателя ТСНТ-3В проходили при

По результатам расчетов с учетом возможностей изготовления и с целью упрощения конструкции, наиболее предпочтительным был выбран вариант магнитной системы, схема которого показана на рисунке 2. Также на рисунке 2 представлена топология магнитных силовых линий магнитного поля, полученная при расчете данного варианта.

Как видно из рисунка 2, магнитные силовые линии, выходящие из полюса одного магнита и замыкающиеся на противоположном полюсе другого, имеют наклон $\approx 45^\circ$ относительно оси двигателя. Такой же на-



клон должен иметь и канал разрядной камеры. Для получения высоких тяговых, удельных и ресурсных характеристик двигателя необходимо, чтобы у анода индукция была близка к нулю, а срез разрядной камеры должен располагаться в районе максимума магнитной индукции [4].

Таким образом, с помощью полученного расчетом распределения (рис. 3) была спроектирована конструкция разрядной камеры двигателя и определено месторасположение анода. А также принято решение применить центральный микрокатод с характерным размером 6 мм, размещенным в отверстии центрального постоянного магнита.

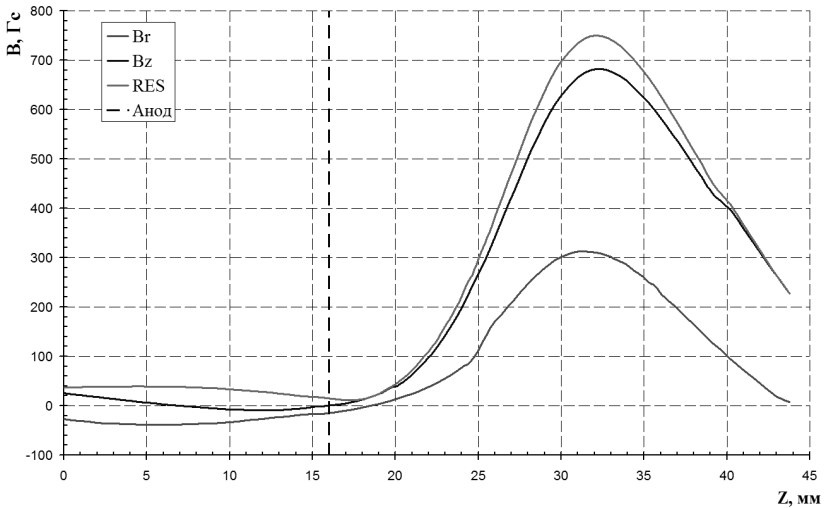


Рис. 3. Распределение радиальной, осевой составляющих магнитной индукции и результирующей магнитной индукции по центру канала разрядной камеры СПД-30ПМ

Характерным размером двигателя является внутренний диаметр канала разрядной камеры на срезе, равный 30 мм. Именно поэтому СПД с постоянными магнитами было присвоено наименование СПД-30ПМ.

Конструкция двигателя СПД-30ПМ содержит четыре основные части: разрядную камеру, катод-компенсатор, магнитную систему и интерфейс.

Разрядная камера включает в себя анод на установочных и газо-электрических изоляторах, а также детали общей сборки: наружную и внутреннюю керамические вставки и установочный изолятор из керамики. Анод имеет четыре места крепления, один поджигной электрод и восемь отверстий для подачи рабочего тела.

Керамический катод выполнен в виде интегрированной сборки термоэмиссионного узла, поджигного электрода, элементов крепежа и графитовых уплотнителей. Термоэмиссионный узел состоит из диафрагмы, керамического корпуса, эмиттера пластинчатой формы, выполненного из эмиссионного материала типа LaB_6 , закрепленного в керамической капсуле. Нагреватель катода монтируется непосредственно на капсулу, его электрические выводы проходят в зону интерфейса через отверстия основного изолятора.

Магнитная система (рис. 4) состоит из двух постоянных магнитов (наружного и составного внутреннего), магнитопровода и двух магнитных экранов. Внутренний постоянный магнит включает в себя набор постоянных магнитов кольцевой формы. Все они собираются в корпусе (из немагнитопроводящего материала), который крепится к внутреннему магнитному экрану. Таким образом, внутренний постоянный магнит представляет собой полый цилиндр с отверстием, куда помещается катод. Наружный постоянный магнит имеет форму кольца с разрезом, намагничен в радиальном направлении. Вставляется он в обойму (также из немагнитопроводящего материала), которая крепится к магнитопроводу. Постоянные магниты выполнены на основе магнито-твердого спеченного сплава, характеризуются высокими магнитными свойствами, отличной коррозионной устойчивостью и хорошей стабильностью параметров при высоких температурах [3].

Характеристики постоянных магнитов, примененных в магнитной системе СПД-30ПМ:

– внутренний постоянный магнит: $B_r = 1,07$ Тл, $H_c = 780$ кА/м, максимальное энергетическое произведение (BH_{\max}) = 216 кДж/м³, индукция на оси магнита $B_0 = 182,5$ мТл;

– наружный постоянный магнит: $B_r = 1,07$ Тл, $H_c = 780$ кА/м, (BH_{\max}) = 216 кДж/м³, $B_0 = 25$ мТл.

Магниты после намагничивания проходили процедуру термостабилизации.

Интерфейс двигателя состоит из платы с газораспределителем, основного изолятора, изоляционной пластины, а также разъемных электрических и газовых соединений. Рабочее тело подается в газораспределитель через разъемные соединения основного и резервного тракта подачи, далее подается в анод и катод. Внешний вид изготовленной магнитной системы СПД-30ПМ, закрепленной на плате, показан на рисунке 5.

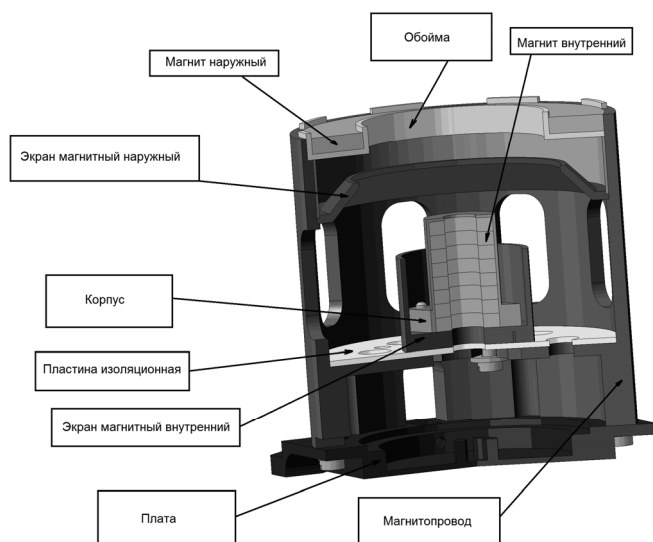


Рис. 4. Магнитная система СПД-30ПМ



В отличие от СПД с катушками намагничивания, СПД с постоянными магнитами имеют ряд преимуществ, таких как снижение потребления электрической энергии, снижение массы и размеров двигателя, снижение температуры преимущественно внутренних элементов двигателя из-за отсутствия эффекта Джоуля – Ленца, увеличение надежности, и как результат снижение стоимости двигателя.

Однако при применении СПД с постоянными магнитами в составе космических аппаратов (КА) возможно воздействие магнитного поля постоянных магнитов на системы КА, в частности на системы магнитной ориентации КА на околоземных орбитах.

В будущем для анализа совместимости СПД с постоянными магнитами с системами КА, например МКА на околоземных орбитах, планируется проведение совместных исследований с разработчиком КА.



Рис. 5. Внешний вид магнитной системы двигателя СПД-30ПМ

101

Список литературы

1. Горшков О. А., Муравлёв В. А., Шагайда А. А. Холловские и ионные двигатели для космических аппаратов // под ред. А. С. Коротева. М., 2008.
2. Shirasaki A., Tahara H. Low-Power Cylindrical Hall Thruster R&D. Osaka, 2010.
3. Альтман А. Б., Герберг А. Н., Гладышев П. А. и др. / под ред. Ю.М. Пятина. Постоянные магниты : справ. 2-е изд., перераб. и доп. М., 1980.
4. Морозов А. И., Есипчук Ю. В., Капулкин А. М. и др. Влияние конфигурации магнитного поля на режим работы ускорителя с замкнутым дрейфом электронов (УЗДП) ЖТФ. Л., 1972. Т. 42, вып. 3.

Об авторах

Алексей Валерьевич Каташов — асп., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, инженер-конструктор ФГУП ОКБ «Факел», Калининград.
E-mail: katashov39@mail.ru

Константин Николаевич Козубский — канд. техн. наук, главный конструктор по направлению ФГУП ОКБ «Факел», Калининград.
E-mail: katashov39@mail.ru

About the authors

Aleksey Katashov — PhD student, I. Kant Baltic Federal University, design-engineer, EDB «Fakel», Kaliningrad.
E-mail: katashov39@mail.ru

Konstantin Kozubzskiy — PhD, design leader, EDB «Fakel», Kaliningrad.
E-mail: katashov39@mail.ru