

Рис. 6. Суммарные затраты характеристической скорости в зависимости от минимального гарантированного времени. Для локальных минимумов обозначены соответствующие диапазоны высот орбит фазирования.

Варьируя диапазон высот орбит фазирования, возможно уменьшить  $T_{\min}$  так, что суммарные затраты характеристической скорости увеличатся незначительно по сравнению с минимальным значением (рис. 5).

Таким образом, с помощью разработанной модели установлены способы маневрирования, а также определены зависимости между основными параметрами двухрежимного способа функционирования КА ДЗЗ. При использовании таких переходов 2-3 раза в год за срок активного существования 7 лет затраты характеристической скорости не будут превышать 5 км/с, что оценочно соответствует массе КА мене 10т с полезной нагрузкой массой 2т. КА способен обеспечить оперативное наблюдение любой точки на поверхности Земли с вероятностью почти 0,5, либо гарантировано в течение двух дней. При использовании двух или четырех таких КА, а также учитывая, что съемка может производиться под углом к направлению в надир, значения этих параметров улучшатся. В дальнейшем необходимо оценить эффективность использования малочисленной группировки КА, функционирующих описанным способом.

#### Библиографический список

1. Д.Г. Цируль, В.И. Ермолаев. Двухрежимный способ наблюдения земной поверхности и анализ возможности его применения при функционировании космических аппаратов дистанционного зондирования Земли. Вестник СибГАУ. Том18, №1. С. 176-186. УДК 629.78.001.
2. Методы оптимизации проектных параметров маршевых двигательных установок и способов маневрирования космических аппаратов / В.И. Ермолаев; Балт. гос. техн. ун-т. СПб., 2017. – 80 с.

УДК 621.455.32

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ РОТОРНОГО МАГНИТОПЛАЗМЕННОГО ДВИГАТЕЛЯ

*М. Я. Яковлев, В. И. Ермолаев*

*Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова*

В настоящее время широкое применение в качестве двигателей космических аппаратов (КА) получили электроракетные двигатели (ЭРД). Это обусловлено тем, что удельный импульс таких двигателей более чем на порядок выше удельного импульса химических ракетных двигателей.

Однако ЭРД не позволяют получить большие значения тяги, т.к. при увеличении тяги существенно возрастают массы преобразователей энергии и тоководов, а также становятся неприемлемыми размеры радиаторов, обеспечивающих отвод тепловых потоков. Данные факторы сдерживают использование ЭРД в перспективных КА. Для решения этой проблемы в БГТУ «Военмех» предложен роторный магнитоплазменный двигатель (РМПД) [1].

Для обоснования параметров предложенного двигателя и определения областей его рационального использования необходима математическая модель, описывающая процессы, протекающие в двигателе, и позволяющая определять оптимальные значения проектных параметров. При ее разработке была принята следующая физическая картина протекающих в двигателе процессов.

Камера двигателя (рисунок 1) состоит из многополостного катода 1 и сопла-анода 2, вокруг которого расположен соленоид 3. При наличии разницы потенциалов между периферией сопла-анода и многополостным катодом, в среде рабочего тела, находящегося в сопле-аноде, возникает разряд. Вокруг тока разряда образуется азимутальное магнитное поле. Взаимодействие радиальной составляющей тока разряда с азимутальным магнитным полем порождает силу Ампера, действующую на плазму и направленную к выходному сечению сопла.

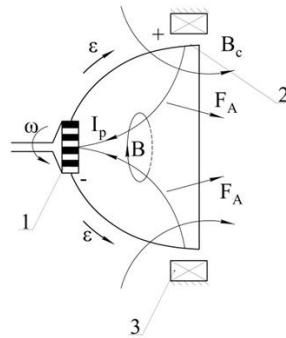


Рис. 1. Принципиальная схема РМПД

Для создания разницы потенциалов между выходной частью сопла-анода и катодом используется явление униполярной индукции. Согласно этому явлению, при вращении токопроводящего сопла во внешнем магнитном поле возникает разность потенциалов между периферией и центральной частью сопла. То есть, вращающееся сопло и внешний соленоид вместе образуют униполярный генератор.

Для работы такого двигателя используется механическая энергия вращения. Источником механической энергии может служить газотурбинный преобразователь, применение которого предполагается в ядерных энергодвигательных установках или маховичный накопитель энергии, целесообразность использования которого обусловлена его высокой удельной мощностью. Преобразование подводимой механической энергии в электрическую энергию разряда в среде рабочего тела осуществляется непосредственно в камере двигателя за счет явления униполярной индукции. Благодаря этому существенно снижаются масса системы электроснабжения и массогабаритные характеристики системы отвода тепловой мощности. Снижение массовых характеристик двигательной установки позволяет увеличить тяговооруженность КА, в результате чего обеспечивается повышение оперативности маневрирования КА.

Используемая в настоящее время математическая модель РМПД [1, 4] разработана с множеством допущений и позволяет лишь приближенно оценить параметры двигателя и сделать общий вывод о целесообразности его создания. Для дальнейших исследований РМПД необходимо существенное уточнение данной модели. Ключевым ее выражением является выражение тяги, поэтому авторами было принято решение начать уточнение модели именно с этого выражения.

Для математического описания процесса разгона плазмы в камере РМПД предложено использовать систему магнитогидродинамических уравнений [5]:

$$\rho(\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = -\nabla p + \mathbf{j} \times \mathbf{B}, \quad (1)$$

$$\mathbf{j} = \sigma \left( \mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B} + \frac{1}{ne} \nabla p \right) - \frac{1}{ne} \mathbf{j} \times \mathbf{B}, \quad (2)$$

$$\mathbf{j} = nev, \quad (3)$$

$$\rho = nM. \quad (4)$$

где  $\sigma$  — проводимость плазмы;  $n$  — суммарная концентрация частиц (ионов и электронов);  $M$  — масса иона;  $p = nkT$  — давление.

Первое уравнение системы описывает в векторной форме движение плазмы, второе — обобщенный закон Ома, третье и четвертое — законы сохранения заряда и массы соответственно.

Помимо этого систему (1)–(4) необходимо дополнить системой уравнений Максвелла:

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{ne}{\epsilon_0}, \quad (5)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad (6)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \quad (7)$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \left( \mu \mathbf{j} + \varepsilon_0 \frac{d\mathbf{E}}{dt} \right). \quad (8)$$

где  $\varepsilon_0$  — электрическая постоянная;  $\mu_0$  — магнитная постоянная;  $\mu$  — магнитная проницаемость среды.

Совместное решение систем (3) и (4) позволит описать движение плазмы в камере двигателя.

Электромагнитная составляющая тяги определяется интегралом по объему камеры двигателя [7]:

$$\mathbf{F} = \int_V \mathbf{j} \times \mathbf{B} dV \quad (9)$$

Для решения системы уравнений введем два допущения. Во-первых, процессы, протекающие в разрядной камере — осесимметричны. Во-вторых, будем рассматривать стационарный режим работы двигателя.

Первое допущение позволяет перейти от трехмерной постановки задачи к квазидвумерной. Полностью двумерная постановка невозможна, т.к. вектор магнитной индукции не может лежать в той же плоскости, что и положительный столб тока разряда. Второе допущение позволяет не учитывать «выходы на режим», а рассматривать лишь установившееся истечение рабочего тела в камере.



Рис. 2. Область ускорения плазмы

Введем цилиндрическую систему координат (рисунок 2). В силу допущения о квазидвумерности, проекции векторов на  $\varphi$ , а также частные производные  $\frac{\partial}{\partial \varphi}$  можно опустить. Силовые линии магнитного поля в любом поперечном сечении сопла будет иметь вид концентрических окружностей с центром на оси сопла, поэтому только поле  $\mathbf{B}$  будет иметь проекцию на  $\varphi$ , и только на нее (однако это не означает, что магнитная индукция зависит от одной координаты). Допущение о стационарном режиме позволяет избавиться от производных вида  $\frac{\partial}{\partial t}$ . Расчетная область ограничена торцевой, поверхностью катода, заданной формой поверхности сопла (на рис. 2 — конус) и плоскостью выходного сечения сопла.

Запишем систему (1)–(8) в цилиндрической системе координат в проекциях:

$$\rho v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + \rho v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial r} - ne v_z B_\varphi, \quad (10)$$

$$\rho v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + \rho v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} = \frac{\partial p}{\partial z} + ne v_r B_\varphi, \quad (11)$$

$$ne v_r = \sigma \left( E_r - v_z B_\varphi + \frac{1}{ne} \frac{\partial p}{\partial r} \right) + v_z B_\varphi, \quad (12)$$

$$ne v_z = \sigma \left( E_z + v_r B_\varphi + \frac{1}{ne} \frac{\partial p}{\partial z} \right) - v_r B_\varphi, \quad (13)$$

$$\frac{\partial E_r}{\partial r} + \frac{E_r}{r} + \frac{\partial E_z}{\partial z} = \frac{ne}{\varepsilon_0}, \quad (14)$$

$$\frac{\partial E_r}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial r} = 0, \quad (15)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial B_\varphi}{\partial \varphi} = 0, \quad (16)$$

$$-\frac{\partial B_\varphi}{\partial z} = \mu_0 \left[ \mu n e v_r + \varepsilon_0 \left( v_r \frac{\partial E_r}{\partial r} + v_z \frac{\partial E_r}{\partial z} \right) \right], \quad (17)$$

$$\frac{\partial B_\varphi}{\partial r} + \frac{B_\varphi}{r} = \mu_0 \left[ \mu n e v_z + \varepsilon_0 \left( v_r \frac{\partial E_z}{\partial r} + v_z \frac{\partial E_z}{\partial z} \right) \right]. \quad (18)$$

Уравнения (10), (11) представляют собой уравнения движения в проекциях на оси  $r$  и  $z$ ; уравнения (12), (13) являются выражениями обобщенного закона Ома на те же оси. Выражение (14) — это запись закона Гаусса (5) в цилиндрической системе координат. Уравнения (15), (16) — закон индукции Фарадея (6) в проекции на оси  $r$  и  $z$ , и закона Гаусса для магнитного поля (7) на ось  $\varphi$  соответственно (остальные проекции тождественны нулю). Выражения (17), (18) — теорема о циркуляции магнитного поля (8) в проекции на оси  $r$  и  $z$ . Закон Гаусса для магнитного поля (16) позволяет сделать вывод о линейной зависимости  $B_\varphi(\varphi)$ . То есть вектор магнитной индукции может быть представлен следующим образом:  $\mathbf{B} = (B_r; k\varphi; B_z)$ , где  $k = const$ .

Выражения (10)–(18) за исключением выражения (16) образуют систему из 8 дифференциальных уравнений с 8 неизвестными функциями:  $E_\theta$ ,  $E_r$ ,  $n$ ,  $v_r$ ,  $v_\theta$ ,  $B_\varphi$ ,  $p$  и  $\sigma$ .

Решение указанной системы уравнений может быть выполнено численными методами, основанными на методе конечных элементов. При этом граничные условия должны отражать особенности конструкции рассматриваемого варианта РМПД.

#### Библиографический список

1. Ермолаев В.И., Новиков Ю.А. Электроракетная двигательная установка с маховичным накопителем энергии. В сборнике: Лазерная и ракетно-космическая техника XXI века. Балт. гос. техн. ун-т. СПб., 2016. — с.68–76.
2. Ермолаев В.И., Новиков Ю.А. Электроракетная двигательная установка. Патент на изобретение № 2591972. Опубликовано 20.07.2016. Бюл. № 20.
3. Ермолаев В.И., Новиков Ю.А. Исследование параметров электроракетной двигательной установки с маховичным накопителем энергии // Инновационный арсенал молодежи. Труды Шестой науч.-техн. конф./ ФГУП "КБ "Арсенал"; Балт. гос. техн. ун-т. СПб., 2015. — с. 105–107.
4. Ермолаев В.И., Яковлев М.Я. Математическая модель электроракетной двигательной установки с повышенной удельной тягой // Молодежь. Техника. Космос: статьи и доклады IX Общероссийской молодежной науч.-техн. конф. / Балт. гос. техн. ун-т. СПб., 2017. — с. 90–93.
5. Гришин С.Д. Электрические ракетные двигатели космических аппаратов / С.Д. Гришин, Л.В. Лесков М.: Машиностроение, 1989 — 216 с.
6. Фаворский О.Н. Основы теории космических электрореактивных двигательных установок / О.Н. Фаворский, В.В. Фишгойт, Е.И. Янтовский, под ред. О.Н. Фаворского М.: Высшая школа, 1978 — 384 с.
7. Барабанов Н.А. Исследование области разряда сильноточного МПД двигателя / Н.А. Барабанов // Журнал технической физики. 1995. — т. 65, № 5 — с. 59–66.
8. Суханов Л.А. Электрические униполярные машины / Л.А. Суханов, Р.Х. Сафиуллина, Ю.А. Бобков, под ред. Л.А. Суханова. М.: ВНИИЭМ. Отд-ние науч.-техн. информации, стандартизации и нормализации в электротехнике, 1964. — 136 с.