

УДК 533.9.07

В.П. КИМ, А.И. СКРЫЛЬНИКОВ, Е.К. СИДОРЕНКО

Федеральное государственное научное учреждение «Государственный научно-исследовательский институт прикладной механики и электродинамики», Москва, Россия

ОЦЕНКА ПОТОКОВ ЭНЕРГИИ НА СТЕНКУ РАЗРЯДНОЙ КАМЕРЫ СПД ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЛОКАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ В УСКОРИТЕЛЬНОМ КАНАЛЕ С ПОМОЩЬЮ ПРИСТЕНОЧНЫХ ЗОНДОВ

На основании результатов зондовых измерений параметров плазмы в канале СПД, работающего на различных режимах работы, в том числе, на режимах работы с повышенными разрядными напряжениями и повышенными удельными импульсами, проведена оценка плотности потока энергии, приносимой на стенку ускоренными ионами. Полученные результаты показали, что на рассматриваемых режимах работы двигателя суммарное выделение энергии на обеих стенках разрядной камеры составляет порядка 10-15% от мощности разряда и что доля этой мощности возрастает с увеличением разрядного напряжения.

стационарный плазменный двигатель, пристеночные зонды, потенциал плазмы, потенциал плавания, энергия ионов, мощность разряда, мощность, выделяющаяся на стенке, коэффициент аккомодации.

Введение

Стационарные плазменные двигатели (СПД) достаточно успешно и давно используются в космической технике России, а в последнее время началось применение этого типа ЭРД и в других странах. Расширяется и круг задач, при решении которых планируется использование СПД, и возрастают требования к двигателю по мощности, удельному импульсу и ресурсу. В частности, в настоящее время актуальной является разработка СПД с повышенным до ~3000 с удельным импульсом, тогда как современные летные образцы СПД обеспечивают получение удельного импульса 1500 – 1600 с. В связи с изложенным актуальными являются исследование особенностей работы СПД при повышенных разрядных напряжениях, обеспечивающих большие скорости истечения и увеличенные значения удельного импульса. Среди этих особенностей особенно важным является определение причин, ограничивающих возможности увеличения удельного импульса. Одной из таких причин является перегрев керамических стенок разрядной камеры двигателя из-за выпадения на неё значительной доли ионов и

увеличение скорости распыления стенок ускоренными ионами, приводящее к ускоренному их износу и, как следствие, к уменьшению ресурса двигателя. В данной работе поставлена и решена задача оценки энергии, приносимой на стенку ускоренными ионами для режимов работы двигателя с повышенными напряжениями разряда. При этом оценка проводилась для моделей с разной конфигурацией магнитной системы, обеспечивающих различную конфигурацию силовых линий магнитного поля, с целью оценки возможности контроля выделяющейся на стенках мощности изменением топологии магнитного поля. Оценка названной мощности осуществлялась путем определения распределений локальных параметров плазмы вдоль наружной стенки разрядной камеры с помощью пристеночных зондов.

1. Описание лабораторных моделей и методики измерения

Как уже отмечалось выше, для проведения оценок мощности определялись распределения локальных параметров плазмы в канале ускорителя. Измерения проводились на двух моделях двигателя,

имеющих различную конфигурацию магнитной системы. В первой модели (рис. 1, далее вариант1) двигатель имел малые продольные зазоры между магнитными экранами и полюсами, что характерно для современных летных образцов СПД.

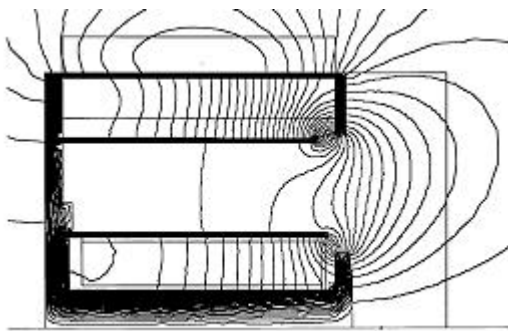


Рис. 1. Топология магнитного поля для варианта 1

Во второй модели (рис. 2, далее вариант 2) двигатель имел продольные зазоры между полюсами и экранами, сопоставимые с межполюсным зазором. В этом случае топология магнитного поля имела четко выраженную линзоподобную геометрию магнитных силовых линий (рис. 2).

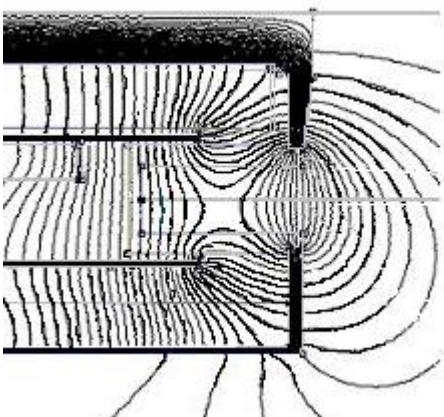


Рис. 2. Топология магнитного поля во втором варианте двигателя

Эти модели двигателей были оснащены пристеночными зондами, с помощью которых были определены распределения локальных параметров плазмы вдоль ускорительного канала: потенциал плавления, потенциал плазмы, электронная температура, распределение плотности ионного и электронного токов на зонд. Зонды были установлены на внешней

стенке разрядной камеры двигателя так, что их рабочая поверхность располагалась заподлицо с внутренней поверхностью стенки (рис. 3).

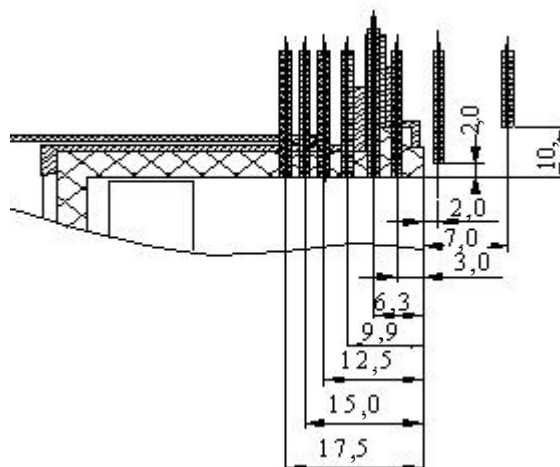


Рис. 3. Схема расположения пристеночных зондов

В дополнение к пристеночным зондам снаружи разрядной камеры были установлены два дополнительных зонда. Коллектор внутренних зондов был выполнен из вольфрамовой проволоки диаметром 0,5 мм, а наружных – с диаметром 2,5 мм.

Измерения проводились при работе двигателя в вакуумной камере длиной 7 м, и диаметром 2 м. Исследование проводилось при изменении напряжения разряда U в диапазоне (300 – 900) В и расхода ксенона m в диапазоне (2,0 – 7,24) мг/с.

При проведении экспериментов в камере обеспечивалось давление не выше $7 \cdot 10^{-5}$ мм рт ст.

Снятие зондовых характеристик осуществлялось стандартным способом. На коллектор каждого из зондов подавалось пилообразное напряжение и с помощью цифрового осциллографа производилась их регистрация.

Обработка зондовых характеристик осуществлялась по стандартной методике [1, 2].

2. Результаты локальных измерений

Типичные результаты локальных измерений параметров плазмы для обоих вариантов двигателя показаны на следующих рисунках:

— на рис. 4 показано распределение потенциала плазмы φ_{pl} и плавления φ_0 при работе двигателя на режиме с напряжением разряда $U = 700$ В, расходом рабочего тела $m = 2,5$ мг/с;

— на рис. 5 показано распределение плотности ионного тока j_i , приходящего на стенку разрядной камеры двигателя, при напряжении разряда $U = 700$ В, расходе рабочего тела $m = 2,5$ мг/с, а на рис. 6 – соответствующие распределения температуры электронов.

Из приведенных данных видно существенное различие в распределениях потенциалов в различных моделях двигателя.

Двигатель в варианте 1 (классическая топология магнитного поля) имеет более широкий слой ионизации и ускорения, составляющий порядка 10 мм от среза канала двигателя, а так же более низкий потенциал плавления по сравнению с двигателем в варианте 2 (с линзоподобной геометрией магнитного поля). Такая тенденция сохраняется и при работе на других режимах работы.

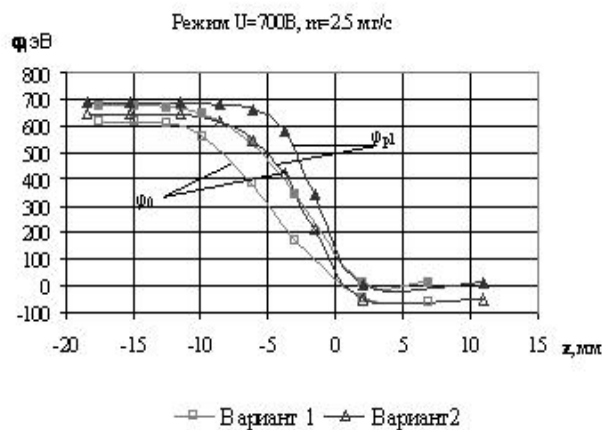


Рис. 4. Распределение потенциалов плазмы и потенциалов плавления вдоль канала ускорителя

Сравнение показало также, что на данном режиме работы у двигателя в варианте 1, максимум плотности ионного тока в смещен в направлении анода (рис. 5), что может быть объяснено более высокой температурой электронов в прианодной области (рис. 6).

Как видно из приведенных данных, изменение потенциала в области с максимальными значениями плотности тока на зонд (стенку) незначительно. Поэтому зону с максимальным значением плотности ионного тока можно трактовать как зону ионизации. Видно также, что максимальные значения температуры электронов достигаются в области с максимальной напряженностью электрического поля. В прикладном плане важно то, что, изменяя топологию магнитного поля, можно значительно изменять распределения локальных параметров плазмы в ускорительном канале двигателя.

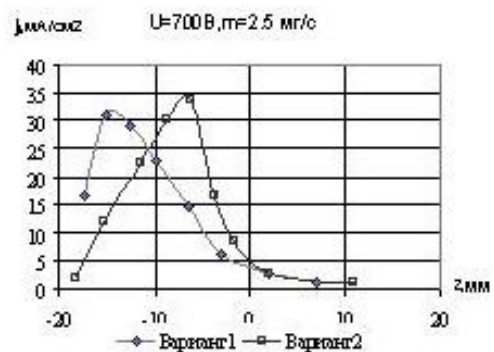


Рис. 5. Распределение плотности ионного тока на стенку канала

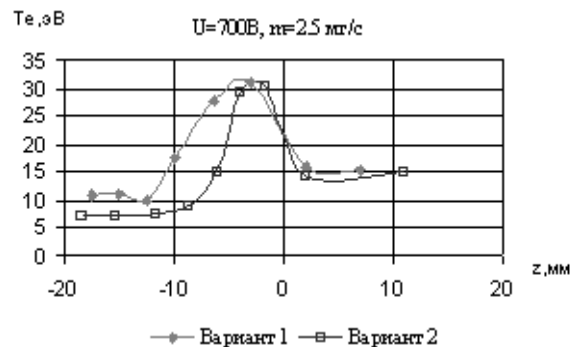


Рис. 6. Распределения температуры электронов по длине канала

3. Оценка мощности, выделяющейся на стенке

С использованием полученных данных была произведена оценка плотности потока энергии, приносимой на стенку разрядной камеры ускоренными ионами. При этом использовались следующие допущения:

- потенциал плазмы в месте рождения ионов принимался равным потенциалу плазмы в зоне ионизации;
- потенциал стенки принимался равным потенциалу плавания зонда φ_0 ;
- распределения локальных параметров плазмы принимались одинаковыми в различных сечениях по азимуту.

Используя эти предположения, можно оценить мощность, выделяющуюся на стенке с помощью следующего выражения:

$$Q = R \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^L j_i(z) \varepsilon_i(z) \alpha(\varepsilon_i(z)) dz, \quad (1)$$

где R – радиус стенки;

φ – угол в азимутальном направлении;

$j_i(z)$ – плотность потока ионов;

$\varepsilon_i(z)$ – энергия ионов;

$\alpha(\varepsilon_i(z))$ – коэффициент аккомодации, соответствующий значению энергии $\varepsilon_i(z)$;

L – длина канала.

Энергия ионов была определена как разность потенциалов, которую они проходят от места своего рождения до стенки:

$$\varepsilon_i(z) = \varphi - \varphi_0(z), \quad (2)$$

где φ – потенциал плазмы в области ионизации;

$\varphi_0(z)$ – потенциал плавания стенки разрядной камеры, соответствующий координате z .

Для каждого значения энергии определялся коэффициент аккомодации $\alpha(\varepsilon_i(z))$. Его значения были взяты из работы [3].

Полный ток ионов I_i на стенку разрядной камеры определялся интегрированием распределения плотности ионного тока:

$$I_i = R \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^L j_i(z) dz. \quad (3)$$

Полученные данные показали, что при повышении напряжения разряда происходит возрастание мощности выделяющейся на стенке как для варианта 1 так и для варианта 2 (рис. 7) для различных рас-

ходов рабочего тела. Коэффициент K_n , равный отношению мощности выделяемой на стенке, рассчитанной по выражению (1), к мощности разряда N , лежит в диапазоне от 4 до 7 % для наружной стенки разрядной камеры. Аналогично ведет себя и суммарный ионный ток I_i , однако для варианта 2 имеется тенденция к насыщению при переходе на более высокие значения напряжения разряда.

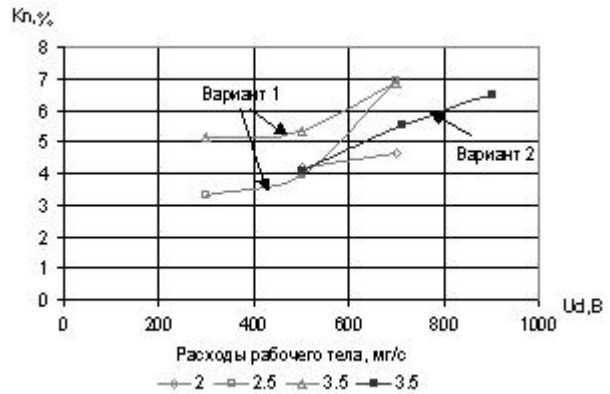


Рис. 7. Отношение мощности выделяемой на стенках разрядной камеры к мощности разряда

На рис. 8 показана зависимость коэффициента K_i , определяемого как отношение тока ионов, пришедших на стенку, к току соответствующему расходу рабочего тела:

$$K_i = \frac{I_i}{I_m}. \quad (4)$$

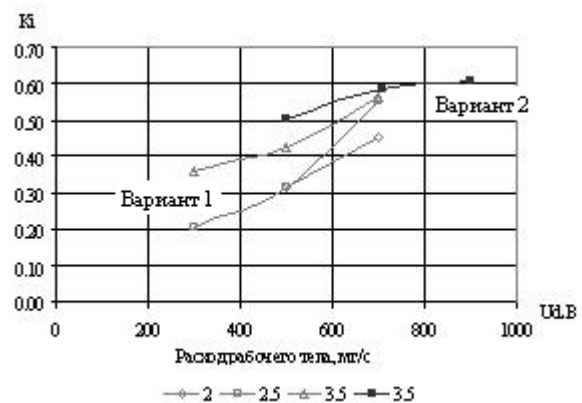


Рис. 8. Отношение тока ионов пришедших на стенку к расходному току

Следует отметить, что средние значения мощности и тока приходящего на стенку камеры для разных моделей примерно равны, хотя распределения

локальных параметров плазмы внутри ускорительного канала двигателя значительно различаются.

Особенно это заметно при работе двигателя на расходе 2,5 мг/с, при котором было получено существенное различие в распределении плотности потока энергии, приходящей на стенку камеры для рассматриваемых вариантов двигателя (рис. 9).

Такое различие связано, в первую очередь, с разной конфигурацией магнитной системы двигателя и позволяет оценить её влияние на процессы в канале ускорителя.

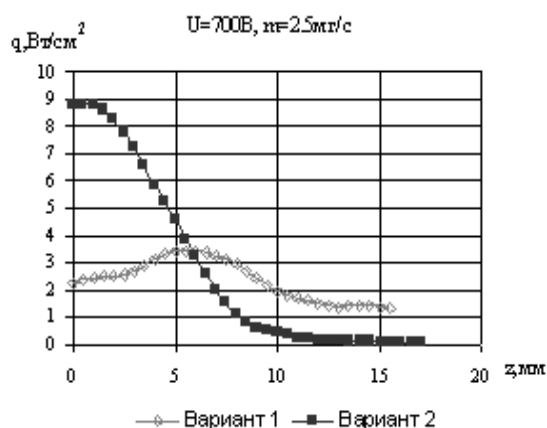


Рис. 9. Распределение плотности энергии вдоль стенки разрядной камеры.

По результатам вычислений можно отметить, что распределение плотности энергии для двигателя с классической топологией магнитного поля более равномерно, чем для двигателя с линзоподобной топологией магнитных силовых линий. Поэтому для варианта 1 можно ожидать более высокие ресурсные показатели, так как величина плотности энергии на срезе канала двигателя значительно ниже.

Заключение

На основании результатов локальных измерений параметров плазмы в канале ускорителя с использованием приведенной выше методики была произведена оценка мощности выделяющейся на наружной стенке разрядной камеры двигателя. В частности было получено:

- с учетом коэффициента аккомодации энергии ионов $\sim 0,6$ суммарная мощность будет равной порядка 7% от мощности разряда, т.е. общие потери энергии на обеих стенках камеры могут составлять от 10 до 15%;
- выявлено существенное различие в распределении плотности энергии вдоль стенки разрядной камеры для двигателей с различной конфигурацией магнитной системы.

Литература

1. Русанов В.Д. Современные методы исследования плазмы. – М.: Атомиздат, 1962. – 302 с.
2. Козлов О.В. Электрический зонд в плазме. – М.: Атомиздат, 1969. – 318 с.
3. Kim V., Semenov A, Shkarban I. Investigation of the accelerated ions energy accommodation under their impingement with solid surfaces- paper // AIAA 2002-4110, Joint Propulsion Conference, 7-10 July 2002, Indianapolis, In, USA.

Поступила в редакцию 12.06.2006

Рецензент: член-корреспондент РАН, д-р техн. наук, проф. Г.А. Попов, ФГНУ «НИИПМЭ», Москва.