

УДК 629.7.036.74

А. В. Михайлюченко, А. В. Румянцев

**АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ РАЗРУШЕНИЯ СТенок
ВАКУУМНОЙ КАМЕРЫ ИСПЫТАТЕЛЬНОГО СТЕНДА**

Представлены результаты исследований взаимодействия стенок вакуумной камеры испытательного стенда с плазменной струей СПД. Разработана методика расчета распыления элементов вакуумной камеры. Приведены результаты расчетов распыления вакуумной испытательной камеры с плазменной струей СПД-100 и СПД-100Д, а также один из способов защиты стенок камеры от распыления.



This article presents the results of studies into the interaction between the walls of a test rig's vacuum chamber and an SPD plasma jet. A method for calculating the spray elements of the vacuum chamber has been devised. The article presents the results of calculation of vacuum test chamber sputtering with an SPD-100 and SPD-100D plasma stream, as well as a way to protect the chamber's walls from sputtering.

Ключевые слова: стационарный плазменный двигатель, угловое распределение плазменного потока, вакуумная камера, модель распыления вакуумной камеры.

Key words: stationary plasma thruster (SPT), angular distribution of plasma flow, vacuum chamber, pattern of vacuum chamber sputtering.

В России значительные успехи достигнуты в разработке и применении стационарных плазменных двигателей (СПД), которые в настоящее время активно используются в отечественной космической технике. Серийные отечественные СПД, разрабатываемые ОКБ «Факел», имеют удельный импульс тяги не более 1700 с, то есть значительно меньше требуемого даже для решения задач коррекции орбит современных геостационарных ИСЗ. В связи с этим все более актуальной становится задача разработки СПД с повышенными параметрами. В последнее время актуализировался и вопрос о разработке высокоимпульсных двигателей, таких как СПД-100Д или СПД-140Д.

При наземной отработке таких двигателей на стенки вакуумной камеры испытательного стенда воздействует струя высокоэнергетических ионов ксенона. На рисунке 1 представлено угловое распределение плазменного потока на поверхности сферы, отстоящей от СПД-140Д на расстоянии 1 м.

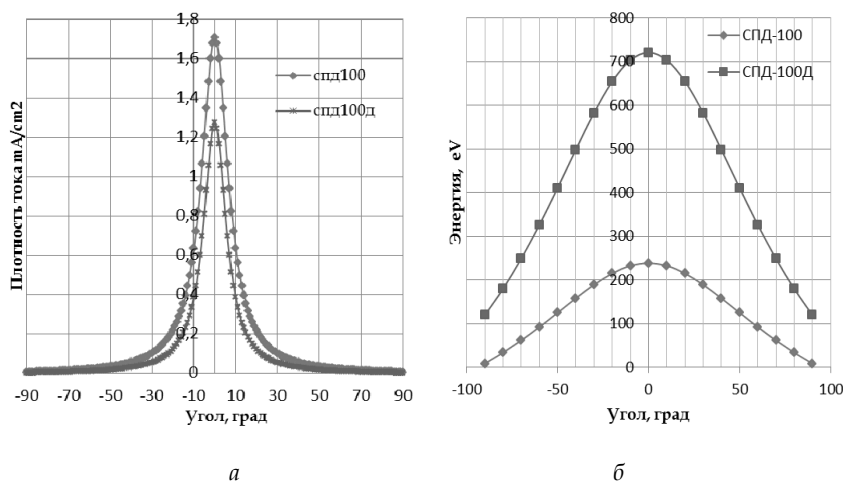


Рис. 1. Угловое распределение потока плазмы на поверхности полусферы радиусом 1 м:
 а – плотность ионного тока; б – средняя энергия ионов



Из рисунка 1 видно, что энергия ионов модифицированного двигателя СПД-100Д в 3 раза превышает значение энергии ионов в двигателе СПД-100, при этом ионный поток сосредоточен в сравнительно малом телесном угле. Отсюда следует, что по мере совершенствования ЭРД возрастает негативное воздействие плазменного потока на стенки вакуумной камеры в процессе наземной отработки двигателей. Под действием ионного потока происходит распыление материала стенок камеры. Продукты распыления оседают на стенках камеры, а также частично проникают в ускорительный канал и оседают на его керамических стенках, увеличивая проводимость канала, что негативно влияет на рабочий процесс в двигателе. В результате условия наземных огневых испытаний двигателей могут существенно отличаться от условий в космосе, поэтому возникает проблема доверия к результатам наземных исследований. Сама камера при этом существенно разогревается в области падения ионного потока, что приводит к интенсификации истончения ее стенок.

Сложившаяся ситуация свидетельствует о необходимости изменения технологии наземных испытаний и создания оборудования, предотвращающего распыление материала стенок вакуумной камеры. Пассивные методы защиты, по-видимому, малоэффективны, так как при энергии ионов в несколько сотен эВ коэффициент уноса имеет значительную величину практически для всех материалов. Так, установка в зоне падения на стенку камеры углепластикового экрана привела к тому, что на стенках ускорительного канала СПД наблюдалось осаждение углеродных нанотрубок, частиц аморфного углерода и, предположительно, фуллеренов. Известно [1], что коэффициент уноса зависит от энергии бомбардирующих ионов и угла падения ионов на преграду. В общем случае он может быть представлен как произведение функции, зависящей от энергии ионов, и функции, зависящей от угла падения ионов на преграду:

$$K(\varepsilon, \varphi) = S_\varepsilon \cdot S_\varphi \quad (1)$$

Как показали исследования [2; 3], коэффициент S_ε линейно зависит от энергии и принимает существенное значение при энергиях 50–100 эВ, а зависимость S_φ от угла падения нелинейна, что свидетельствует о различных механизмах взаимодействия ионов с преградой – в частности, в области больших углов преобладают упругие столкновения. На рисунке 2 представлены указанные зависимости для различных материалов: Ст.3, 1Х18Н9Т (кислотостойкая сталь), Мо, W.

Из распределения плотности ионного тока по углу (см. рис. 1, а) следует:

$$j = \frac{R^2}{r^2} \left(a_0 + \frac{a_1}{\theta^2 + a_2} - a_0 \right), \quad (2)$$

где j – плотность ионного тока (мА/см²); R – измеряемое расстояние (1 м); r – расстояние от двигателя (м); θ – угол от оси двигателя (°); a_0 , a_1 , a_2 – безразмерные коэффициенты.

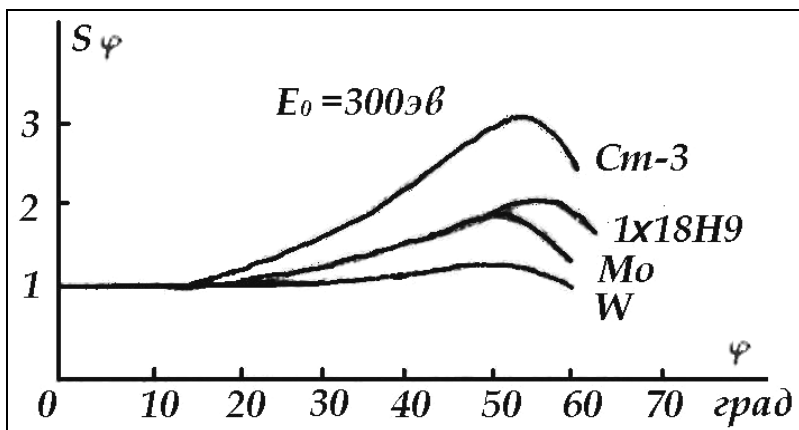


Рис. 2. Коэффициент распыления различных металлов в зависимости от энергии падения ионов

Сразу рассчитать количество ионов, летящих от двигателя в направлении стенки камеры, не удастся, поэтому вычислим ионный ток в кольце (рис. 3) по формуле:

$$j_{\text{кол}} = 2\pi r^2 \sin \theta \partial \theta, \tag{3}$$

где $j_{\text{кол}}$ – суммарная плотность тока в кольце (А/кол.); r – расстояние от двигателя (м); θ – угол от оси двигателя (град).

По формуле (3) в диапазоне от 0° до 90° с шагом в 1° вычисляется значение плотности тока для каждого кольца. Плазма струи двигателя состоит в основном из ионов, ионизованных один раз. Имеется также незначительное количество ионов и с большей степенью ионизации, но ими можно пренебречь. Для вычисления количества ионов, испускаемых двигателем, делим полученные данные по формуле (3) на элементарный заряд электрона: $N_{\text{кол}} = j_{\text{кол}}/e$, где $N_{\text{кол}}$ – количество ионов в кольце; e – заряд электрона. В итоге количество распыленных атомов при проецировании этого кольца на стенку вакуумной испытательной камеры (рис. 4) вычисляется по формуле:

$$N_{\text{рас}} = N_{\text{кол}} S_{\text{угл}} S_{\text{энг.}}$$

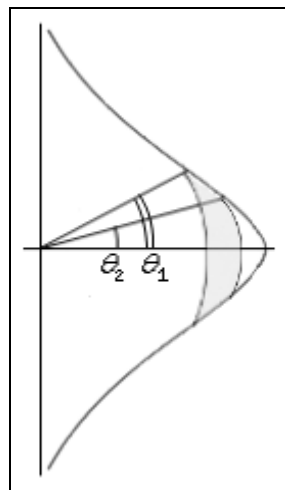


Рис. 3. Кольцо суммарного ионного тока между θ_1 и θ_2

При суммировании всех распыляемых колец будет получено количество распыляемых атомов по всей поверхности вакуумной камеры.

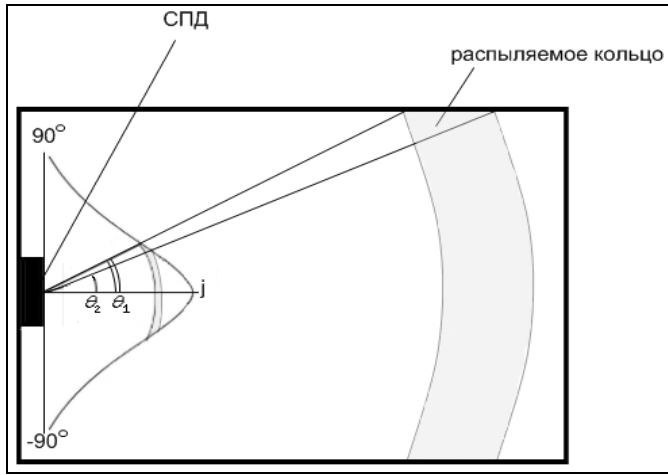


Рис. 4. Проекция кольца на стенку камеры

Созданный математический алгоритм позволяет оценить распыление стенок вакуумных камер испытательных стендов. На рисунке 5 предоставлено графическое отображение расчетов для одного из стендов ОКБ «Факел».

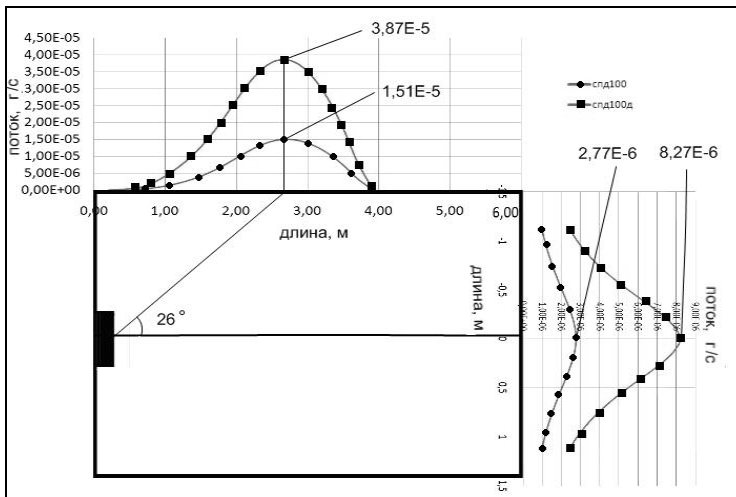


Рис. 5. Распределение потоков распыляемого вещества по геометрии камеры

Как видно, применение высокоимпульсного двигателя увеличивает количество распыляемого материала более чем в 2 раза. Распыленный материал осаждается на конструктивные элементы стендовых систем (шиберные затворы, головки криогенных насосов, герморазъемы, кабельную сеть и т. д.), а также на испытываемое изделие, что приводит к нарушению физики процесса ионизации в ускорительном канале.



Для защиты от распыления в настоящее время в России и за рубежом используется пассивный метод. Суть его заключается в том, что распыляемые стенки покрывают материалом, более труднораспыляемым, чем основа. Оптимальным таким материалом является графит, поскольку он легко обрабатывается, доступен и обладает (см. рис. 2) достаточно низким коэффициентом распыления. Также применяются специальные экраны из графита, которые ставятся под углом к струе, истекающей из СПД; при этом угол выбирается таким, чтобы ионы ксенона упруго отражались от экранов. На рисунке 6 предоставлено графическое отображение распыления стенок вакуумной камеры, покрытой углеродом.

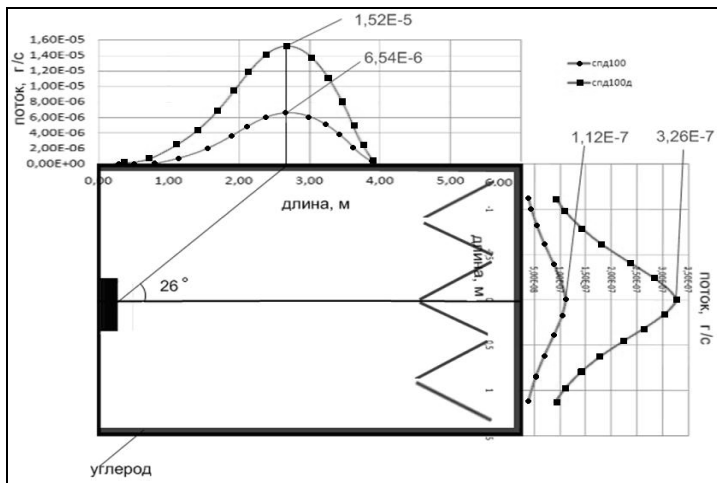


Рис. 6. Распределение потоков распыляемого вещества со стенок вакуумной камеры, покрытой графитом, и с поставленными экранами из графита

Количественные характеристики распыления уменьшились, а тенденция и зоны распыления остались прежними. Требуется выработка совершенно нового метода защиты от распыления стенок камеры. Предлагаемый нами алгоритм позволяет оценить количество распыляемого материала еще до начала испытаний для других двигателей и вакуумных камер.

Список литературы

1. Морозов А. Физические основы космических электрореактивных двигателей. М., 1978. Т. 1.
2. Arhipov B., Goghaja E., Nikulin N. Study of Plasma dynamics in variable section channel of stationary Plasma Thruster // 26 th International Electric Propulsion Conference, IEPC – 99 – 118. Kitakyushu, 1999.
3. Arhipov B., Goghaja E., Nikulin N. Numerical research of dynamics of stream in the stationary plasma thruster channel of a variable // 34-th International Electric Propulsion Conference, AIAA-98-3800. Cleveland, 1998.



Об авторах

Александр Васильевич Михайлюченко – асп., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, инженер по огневым испытаниям 1-й категории ОКБ «Факел», Калининград.

E-mail: mikhaylyuchenko.alex@gmail.com

Альберт Владимирович Румянцев – канд. физ.-мат. наук, проф., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.

E-mail: albert37@list.ru

About the authors

Alexander Mikhailyuchenko, PhD student, I. Kant Baltic Federal University, Fire Test Engineer, EDB «Fakel» experimental engineering bureau, Kaliningrad.

E-mail: mikhaylyuchenko.alex@gmail.com

Dr Albert Rumyantsev, Professor, I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.

E-mail: albert37@list.ru