

УДК 533.59:621.455:537.534

## ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВЫЛЕТАЮЩЕГО ИЗ СТАЦИОНАРНОГО ПЛАЗМЕННОГО ДВИГАТЕЛЯ РАСПЫЛЯЕМОГО МАТЕРИАЛА СТенок РАЗРЯДНОЙ КАМЕРЫ

© 2022 г. М. В. Абгарян<sup>а</sup>, В. П. Ким<sup>а, \*</sup>, А. А. Семенов<sup>б, \*\*</sup>

<sup>а</sup>Научно-исследовательский институт прикладной механики и электродинамики  
Московского авиационного института (Национальный исследовательский университет),  
Москва, 125080 Россия

<sup>б</sup>Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет),  
Москва, 125080 Россия

\*e-mail: riame4@sokol.ru

\*\*e-mail: heat204@mail.ru

Поступила в редакцию 11.01.2022 г.

После доработки 29.03.2022 г.

Принята к публикации 29.03.2022 г.

Представлены методика и результаты расчета временного изменения диаграммы направленности потока материала, распыляемого со стенок разрядной камеры стационарного плазменного двигателя (традиционная схема) при длительной работе. Расчеты показали, что максимум диаграмм направленности по мере наработки двигателя смещается к оси двигателя в сторону меньших углов. Это происходит вследствие раскрытия из-за эрозии стенок выходной части ускорительного канала двигателя, которая расширяется в результате удаления распыленного материала этих стенок, наиболее подверженных облучению ионным потоком.

**Ключевые слова:** стационарный плазменный двигатель, эрозия поверхности стенок ускорительного канала разрядной камеры, коэффициент распыления, индикатриса потока распыленного материала, численное моделирование.

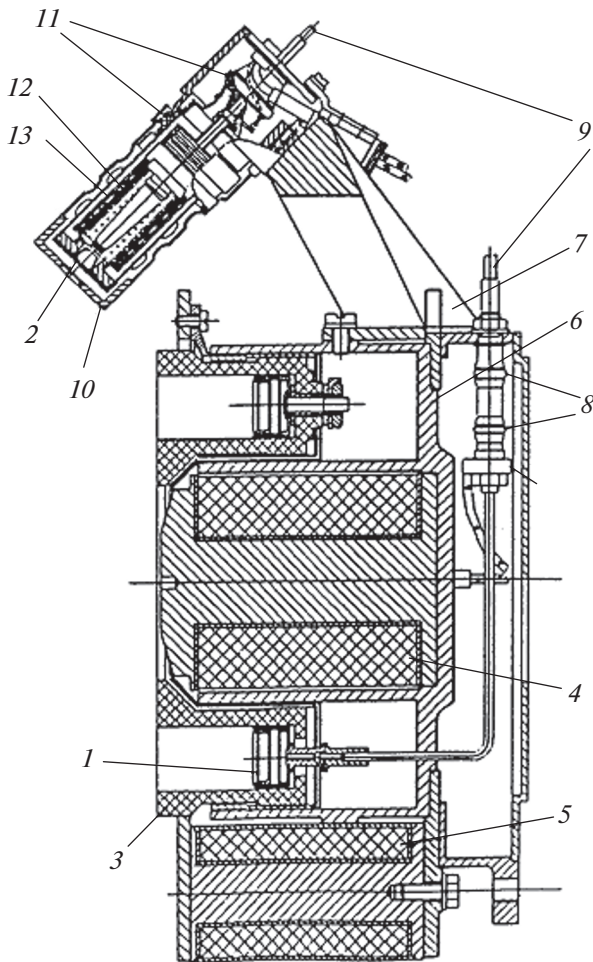
DOI: 10.31857/S102809602210003X

### ВВЕДЕНИЕ

Стационарный плазменный двигатель – одна из разновидностей электроракетного двигателя. К настоящему времени он нашел широкое применение в околоземном космосе, решая задачи до выведения космических аппаратов на рабочие орбиты и их последующего поддержания [1, 2]. Однако до настоящего времени остается недостаточно изученным ряд вопросов, касающихся как физики процессов, протекающих в двигателе, так и его отдельных характеристик, в том числе определяющих совместимость этого двигателя с элементами конструкции космического аппарата. Так, до настоящего времени мало внимания уделяли исследованиям потоков распыленного со стенок разрядной камеры материала, который может осаждаться на поверхностях чувствительных к загрязнению элементов конструкции, таким как оптические элементы и терморегулирующие покрытия. Это объясняется тем, что суммарные потоки распыленного материала за время эксплуатации двигателя невелики. Однако при больших сроках активного существования двига-

телей с большими наработками, порядка 1000 ч и более, воздействие этих потоков может быть значительным. Зависеть оно будет как от величины суммарного потока распыляемого материала, так и от его пространственного распределения. Суммарная величина потока распыленного со стенок вещества и изменение его во времени могут быть легко оценены по результатам ресурсных испытаний конкретного двигателя. В то же время экспериментальное нахождение пространственного распределения распыляемого материала затруднено ввиду относительно малых плотностей потоков, осаждающихся на измерительные датчики. К тому же измерения могут искажаться из-за распыления осаждаемой пленки материала ионным потоком двигателя [3].

В процессе длительной работы двигателя изменяется геометрия распыляемых частей стенок разрядной камеры вследствие ионной эрозии, и диаграмма направленности должна изменяться. Поэтому актуальна разработка методики расчета диаграмм направленности потоков распыленного материала стенок во внешнее пространство



**Рис. 1.** Конструктивная схема двигателя СПД-100: 1 – анод; 2 – катод; 3 – разрядная камера; 4–6 – элементы магнитной системы; 7–13 – элементы конструкции двигателя.

при изменении геометрии стенок в процессе длительной работы двигателя. Разработка такой методики и была задачей настоящей работы.

### ЭРОЗИЯ СТенок РАЗРЯДНОЙ КАМЕРЫ И ПОТОКИ РАСПЫЛЕННОГО МАТЕРИАЛА СТенок

Как известно [4, 5], стационарный плазменный двигатель представляет собой плазменный ускоритель ионов, которые образуются в электрическом разряде, горящем в потоке рабочего вещества, в скрещенных электрическом и магнитном полях. Принципиальная схема двигателя изображена на рис. 1. Электрический разряд возникает в ускорительном канале, выполненном в виде кольцевой щели в разрядной камере, которая изготовлена из теплостой керамики, с малым коэффициентом распыления ускоренными ионами. При работе современных двигателей

часть ускоренных ионов попадает на выходные участки стенок разрядной камеры, ограничивающих ускорительный канал, и распыляет материал стенок. Часть распыленного материала вылетает из ускорительного канала во внешнее пространство.

Ресурс современных двигателей типа СПД-100 составляет не менее 7000 ч. Типичная картина изменения во времени геометрии стенок в результате их распыления в двигателе типа СПД-100 представлена на рис. 2 [6]. Как видно из рисунка, обращенные к разряду поверхности торцевых частей как наружной, так и внутренней стенок разрядной камеры значительно (до 45° и более) разворачиваются в результате удаления распыленного материала стенок. Нормали к обеим поверхностям в начале работы направлены по радиусу. По мере развития эрозии поверхностей стенок они поворачиваются в сторону среза ускорительного канала. Максимум диаграммы направленности локальных потоков распыленного вещества находится обычно в окрестности нормалей [7]. Следовательно, должна значительно изменяться результирующая диаграмма направленности потока распыленного материала стенок разрядной камеры, истекающего из двигателя.

Для расчета потоков распыленного материала помимо данных об изменении геометрии стенок необходимо иметь данные о локальных скоростях распыления материала этих стенок на каждом участке их поверхностей и изменении этих скоростей по мере наработки двигателя. Поэтому естественно использовать имеющиеся методики расчета износа стенок при длительной работе двигателя, позволяющие получить информацию и о локальных скоростях удаления материала стенок. Одна из таких методик была разработана В.К. Абгаряном и В.П. Кимом и описана в [8]. Численно решается система уравнений эрозии элементов внутренней и внешней поверхностей стенок канала разрядной камеры в расчетной зоне вследствие ионного распыления с учетом перенапыления на их поверхности материала, распыленного с других участков поверхностей.

Уравнение эрозии, записанное для скорости перемещения поверхности для каждого элемента поверхности, выглядит следующим образом:

$$\xi = -j_i S(E, \theta, T) + \xi_n, \tag{1}$$

где  $\xi, \xi_n$  – соответственно, скорости перемещения элемента поверхности вглубь материала вследствие удаления распыленного материала и осаждения на тот же элемент материала, распыляемого с других участков поверхностей стенок канала;  $j_i$  – локальная плотность тока ионов, падающих на поверхность,  $S(E, \theta, T)$  – объемный коэффициент распыления материала стенок, за-

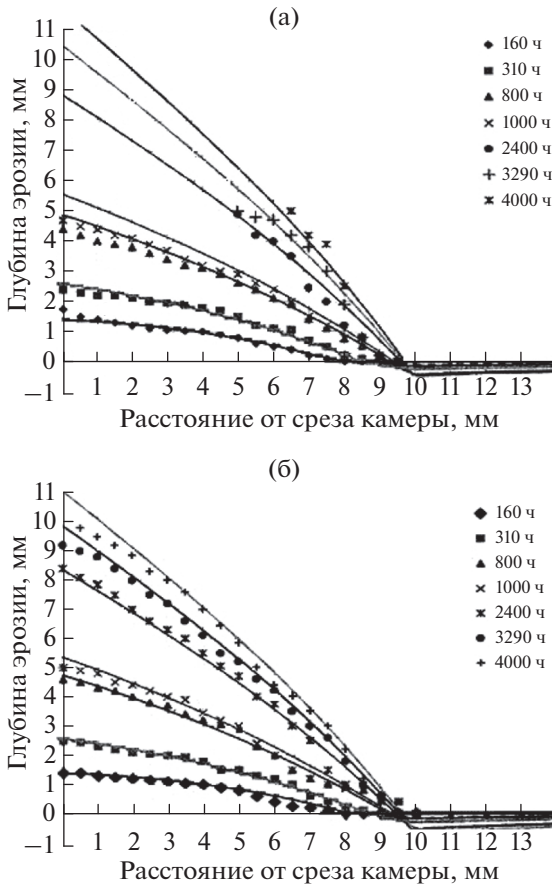


Рис. 2. Профили выходных торцевых участков наружной (а) и внутренней (б) стенок разрядной камеры одного из двигателей типа СПД-100 после 4000-часовых ресурсных испытаний [6].

висящий от энергии ионов  $E$ , локального угла падения  $\theta$  и температуры поверхности  $T$ .

### ПОЛЕ ИОННОГО ПОТОКА В СТАЦИОНАРНОМ ПЛАЗМЕННОМ ДВИГАТЕЛЕ

Для решения уравнения (1) необходимо было разработать модель ионного потока, позволяющую рассчитывать плотность тока и локальный угол падения ионов в произвольных точках поверхностей стенок, изменяющихся во времени. Как известно, даже до настоящего времени не созданы полностью верифицированные теоретические модели для расчета параметров движения ионов и электронов в ускорительном канале стационарного плазменного двигателя. Экспериментальное изучение закономерностей формирования электрического поля и направленных ионных потоков в ускорительном канале двигателя показало, что скорость ионизации максимальна в центральной части достаточно узкого тороидального слоя, в котором происходит основное паде-

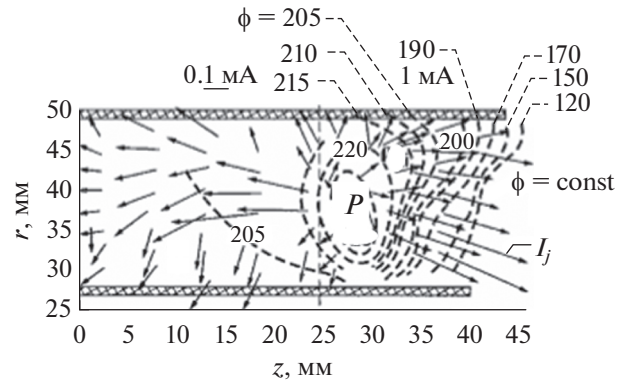


Рис. 3. Структура направленных ионных токов в ускорительном канале лабораторной модели двигателя масштаба СПД-100.

ние электрического потенциала в пространстве между анодом и катодом [9, 10]. Образующиеся в этом слое ионы растекаются по всем направлениям (рис. 3). Пространственную структуру потоков ионов на стенки можно описать, считая их истекающими из тороидального источника с условным центром  $P$  в плоскости продольного сечения канала. Такая модель распределения ионного потока внутри канала двигателя была введена ранее В.П. Кимом [11]. В рамках данной модели получается, что расширение канала по мере работы двигателя вследствие эрозии приводит к тому, что ионы падают на поверхность, все больше удаляясь от центра  $P$  и смещаясь в продольном направлении канала, как показано на рис. 4. В рамках приближения точечного источника ионов это означает, что плотность ионного тока на поверхностях изменяется со временем по мере развития эрозии поверхностей канала. Углы падения ионов также изменяются.

Моделирование износа по упрощенной расчетной методике показало, что для описания поля потоков ионов на обе стенки можно подобрать единый центр  $P$  для обеих поверхностей канала разрядной камеры (рис. 3). Подобное описание поля ионного потока позволило оценить характер временного изменения геометрии стенок канала из-за ионной эрозии. Рассчитанные профили поверхностей во времени приведены на рис. 4 и качественно совпадают с экспериментальными, в частности, имеют ту же кривизну того же знака [11].

### ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ

Достижение количественного совпадения расчетных и экспериментальных профилей эрозии потребовало разработки более детальной модели. Одна из таких моделей была подробно описана

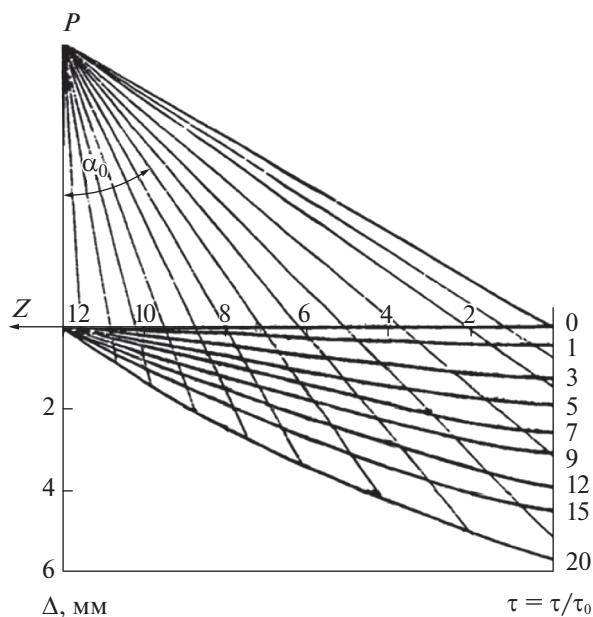


Рис. 4. Модель движения ионных токов на внутреннюю стенку разрядной камеры.

в [12]. При ее разработке, как и в [11], были приняты следующие основные допущения.

Все ионы двигаются из центра  $P$  прямолинейно и только в продольном сечении, т.е. без азимутальной составляющей скорости. Значения энергии ионов не изменяются вдоль траектории и определяются их энергией на исходной поверхности, хотя может быть учтено и ее изменение в освобождающемся в результате распыления пространстве.

Кроме того, диаграмма направленности (индикатриса) потока распыленного материала с произвольного элемента поверхности канала косинусоидальная, т.е.

$$\text{Ind}(\alpha) = \frac{1}{\pi} \cos \alpha, \quad (3)$$

где  $\alpha$  – угол между расчетным направлением и нормалью к поверхности. В используемом диапазоне значений энергии ионов  $E$  несколько сотен эВ (характерная энергия ионов в стационарном плазменном двигателе) коэффициент распыления  $S(E, \theta, T)$  можно разложить на отдельные сомножители и представить в следующем виде:

$$S = S_E(E)Y(\theta)S_T(T), \quad (2)$$

где  $S_E$  и  $S_T$  – соответственно, зависимости коэффициента распыления  $S$  при падении ионов по нормали к поверхности,  $Y(\theta)$  – зависимость относительного коэффициента распыления от угла падения ионов  $\theta$ , отсчитываемого от нормали к поверхности,  $T$  – температура поверхности.

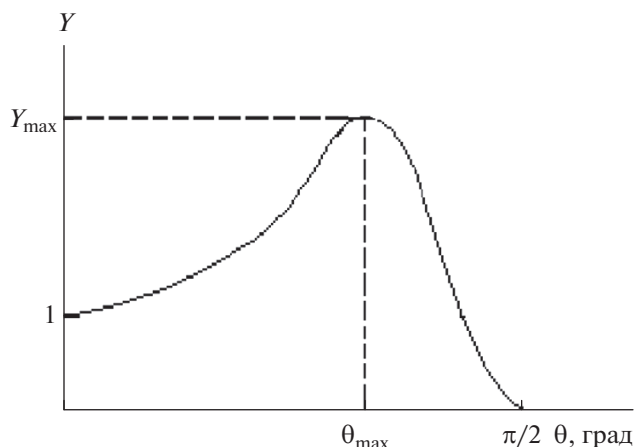


Рис. 5. Угловая зависимость коэффициента распыления.

Характерный вид зависимости  $Y(\theta)$  при падении ионов  $\text{Xe}^+$  с энергией  $E \sim 10^2$  эВ приведен на рис. 5. Максимум зависимости  $Y(\theta)$  для разных материалов достигается при углах падения  $\theta_{\text{max}} = 50^\circ - 60^\circ$ .

В рамках принятых допущений в [12] была построена численная модель расчета профилей эрозии во времени внутренней и внешней поверхностей канала разрядной камеры стационарного плазменного двигателя, которая описана ниже.

### УРАВНЕНИЕ ЭРОЗИИ ПОВЕРХНОСТЕЙ КАНАЛА РАЗРЯДНОЙ КАМЕРЫ

Обозначенные выше допущения позволяют привести уравнение (1) к более удобному для численного интегрирования виду. Уравнение для скорости радиального перемещения элементов  $d\sigma_i$  поверхности внутренней стенки с цилиндрическими координатами  $(z_i, R_i, \phi_i = 0)$  из-за уноса материала выглядит следующим образом:

$$\xi_i = -E_i(z_i, R_i) \bar{Y}(\theta_i) + \frac{\mu}{\pi} \int_0^{L_c} E_j(z_j, R_j) \bar{Y}(\theta_j) R_j \sqrt{1 + \beta_j^2} \times \int_{\phi_1(z_j)}^{\phi_2(z_j)} \frac{\cos(\bar{n}_j, r_{ji}) \cos(\bar{n}_i, -r_{ji})}{|r_{ji}|^2} d\phi_j dz_j, \quad (4)$$

где  $E(z_i, R_i)$  – распыляющая способность ионного потока,  $\bar{Y}(\theta_i) \equiv Y(\theta_i) \cos \theta_i$  – эффективная угловая зависимость относительного коэффициента распыления от угла падения,  $\bar{n}_i$  – вектор нормали к элементу поверхности  $d\sigma_i$  с координатами  $(z_i, R_i, \phi_i = 0)$ ,  $\bar{n}_j$  – вектор нормали к элементу поверхности  $d\sigma_j$  с координатами  $(z_j, R_j, \phi_j)$ ,  $r_{ji}$  – радиус-вектор, направленный от элемента  $d\sigma_j$  к элементу  $d\sigma_i$ ,  $\beta_j = dR_j/dz_j$  – характеристика отклоне-

ния вектора нормали  $\mathbf{n}_i$  к поверхности стенки от радиального направления,  $\mu \leq 1$  — коэффициент осаждения распыленного материала.

Первое слагаемое в правой части (4) описывает ионное распыление поверхности в точке с координатами  $(z_i, R_i)$ . Второе слагаемое описывает перенапыление материала, распыляемого с поверхности наружной стенки на элемент внутренней стенки с теми же координатами  $(z_i, R_i)$ .

Уравнение для скорости радиального перемещения наружной стенки из-за уноса материала для элементов  $d\sigma_j$  поверхности выглядит аналогично (4) с той лишь разницей, что в правой части присутствует еще одно слагаемое, описывающее перенапыление материала с одних участков наружной стенки на другие участки той же стенки. Вид данного слагаемого аналогичен приведенному в правой части (4) интегральному слагаемому. В правой части (4) интегрирование по  $dz_j$  производится в пределах от среза канала до длины  $L_e$ , после которой плотность ионного потока мала, и можно пренебречь ионным распылением поверхности.

Интегрирование по азимутальному углу  $\phi_j$  производится по кольцу наружной стенки канала с текущей осевой координатой  $z_j$ . Пределы интегрирования  $\phi_1(z_j)$ ,  $\phi_2(z_j)$  определяются с учетом возможного затенения потока распыленного материала с элементов  $d\sigma_j$ , расположенных на кольце с координатой  $z_j$ . Затенение данного потока может быть обусловлено элементами  $d\sigma_k$ , расположенными на промежуточных кольцах поверхности внутренней стенки канала, т.е. на кольцах с такими координатами  $z_k$ , что  $\min(z_i, z_j) < z_k < \max(z_i, z_j)$ . В случае отсутствия затенения потока распыленного материала интегрирование по азимутальному углу  $\phi_j$  производится по всему кольцу с координатой  $z_j$ , т.е. от 0 до  $2\pi$ .

Следует особо отметить, что в предлагаемой расчетной методике тщательно разработана процедура учета возможного затенения потоков перенапыления элементами внутренней или наружной поверхностей при всех возможных их комбинациях. Данная процедура позволяет в общем случае аксиально-симметричных поверхностей стенок канала определять пределы интегрирования  $\phi_1(z_j)$ ,  $\phi_2(z_j)$  при наличии потоков перенапыления либо фиксировать, что затенение полностью перекрывает данные потоки. Процедура также подробно описана в [12].

## РАСПЫЛЯЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ

В расчетах эрозии для наружной и внутренней поверхностей канала удобно ввести для каждой

поверхности распыляющую способность  $E_i(z_i, R_i)$ , которая определяется следующим образом:

$$E_i(z_i, R_i) = |j_i(z_i, R_i)| S_E(\varepsilon(z_i, R_i)) T(z_i), \quad (5)$$

где  $\varepsilon(z_i, R_i)$  — энергия ионов в точках поверхности внутренней либо наружной стенки канала с координатами  $(z_i, R_i)$ .

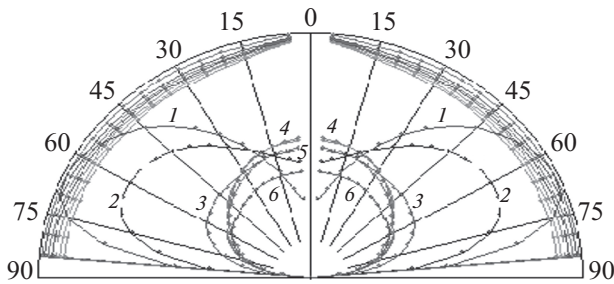
В предлагаемой модели зависимости  $E_i(z_i, R_i)$  для моментов времени  $T > 0$  рассчитываются через зависимости  $E_j^0(z_i, R_i)$  на начальных поверхностях стенок канала путем их пересчета в соответствии с принятым допущением о единичном центре  $P$ , из которого исходят прямолинейные траектории ионов в канале. Значения  $E_i(z_i, R_i)$  изменяются в основном из-за варьирования плотностей ионного тока  $j_i(z_i, R_i)$  за счет модификации геометрии поверхностей из-за эрозии (рис. 4).

Распределения плотности тока и энергии и, следовательно, распыляющей способности  $E_j^0(z_i, R_i)$  на исходных поверхностях стенок разрядной камеры определяются по результатам локальных измерений в ускорительном канале [9, 10, 13]. Для задания зависимостей коэффициента распыления материала стенок от энергии  $S_E$ , угла падения  $Y(\theta)$  и температуры стенок  $S_T$  использовали существующие экспериментальные данные [7]. В.П. Кимом была предложена также методика, позволяющая уточнить распыляющую способность ионного потока по результатам относительно кратковременных эрозионных испытаний, что позволяет еще более точно моделировать износ стенок [12].

Важно также то, что в общем случае следует использовать значение коэффициента распыления  $S$  для материала осаждаемой пленки, определение которого с практической точки зрения является отдельной задачей. В настоящей работе принято упрощение, что материал пленки такой же, как и материал стенок канала, и поэтому для проведения оценочных расчетов зависимости толщины пленки от времени были использованы те же характеристики распыления, что и для материала стенок.

Все вышеизложенное позволяет рассчитывать скорости распыления материала поверхностей наружной и внутренней стенок канала разрядной камеры путем численного решения системы интегро-дифференциальных уравнений эрозии для обеих поверхностей, описанных выше. Для проведения таких расчетов В.К. Абгаряном была разработана соответствующая программа [8, 12], которая позволяет достаточно точно моделировать износ стенок разрядной камеры вследствие их распыления ускоренными ионами (рис. 2).

Отметим, что основное отличие описанной модели в том, что в ней учитывается переосаждение распыленного материала обеих стенок канала



**Рис. 6.** Диаграммы направленности потоков распыленного материала стенок двигателя СПД-100 при разных наработках: 50 (1); 200 (2); 800 (3); 1500 (4); 2500 (5); 3600 ч (6).

с одних участков на другие. В аналогичных моделях других авторов переосаждение не рассматривается.

### ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РАСПЫЛЕННОГО МАТЕРИАЛА ВНЕ КАНАЛА

Описанные модели и программа были использованы для расчета потоков распыленного вещества стенок и их пространственного распределения во внешнем пространстве. Для этого к упомянутым моделям и программе был добавлен блок расчета пространственных распределений распыленных потоков вне двигателя в разные моменты времени с использованием соотношения, аналогичного второму слагаемому в уравнении (4). В результате проведен расчет скоростей износа и геометрии стенок в каждый момент времени и потоков материала на отдельные участки полусферической контрольной поверхности, на которую истекает струя двигателя. Это позволяет построить распределение потоков распыленного материала на контрольной поверхности. За начало координат была взята точка пересечения оси двигателя с выходной плоскостью ускорительного канала. Отметим, что алгоритм расчета потока построен таким образом, что в рамках принятых допущений он применим для расчетов потока распыленного материала на площадки, расположенные на любых расстояниях в двигателе, в том числе и для малых, например, сравнимых с радиусом ускорительного канала.

На рис. 6 приведены результаты расчета диаграмм направленности распыленного материала стенок во внешнем пространстве при разных наработках двигателя. У поверхности полусферы в относительном масштабе изображены также толщины пленки материала, осаждающегося на элементарные площадки, расположенные на одинаковом расстоянии от расчетного центра. Площадки ориентированы таким образом, что нормали к ним направлены в начало координат. Как и ожи-

далось, по мере наработки диаграмма значительно изменяется, а именно при малых наработках доминируют боковые составляющие потока, впоследствии индикатрисы разворачиваются к оси двигателя.

Следует отметить, что результаты расчетного анализа могут измениться, если локальная диаграмма направленности уходящего с поверхности потока будет отличаться от косинусоидальной, принятой в данной модели. Однако качественный характер изменения диаграммы направленности распыленного материала из двигателя должен остаться примерно таким же, поскольку, как уже отмечалось, он определяется прежде всего разворотом профилей стенок в результате их износа, а также тем, что максимум распределения распыленного материала обычно находится в некоторой окрестности нормали к распыляемой поверхности.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование свидетельствует о том, что при длительной работе современных стационарных плазменных двигателей диаграммы направленности потоков распыленного материала стенок значительно изменяются вследствие модификации геометрии выходных участков стенок разрядной камеры. Изменение происходит таким образом, что направления максимальной плотности этих потоков с увеличением наработки смещаются к оси двигателя относительно направлений, близких к радиальным, которые имеют место при малых наработках.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Козубский К.Н., Мурашко В.М., Рылов Ю.П. и др. // Физика плазмы. 2003. Т. 29. № 3. С. 277.
2. Lev D., Myers R.M., Lemmer K.M. et al. The Technological and Commercial Expansion of Electric Propulsion in the Past 24 Years // 35th Int. Electric Propulsion Conf. Atlanta, 2017. P. IEPC-2017-242.
3. Khartov S.A., Nadiradze A.B., Zikeeva Y.V. Angular Distribution of Ceramic Isolator Sputtered Material in the SPT Jet // 28th Int. Electric Propulsion Conf. Toulouse, 2003. P. IEPC-2003-052.
4. Морозов А.И., Есипчук Ю.В., Тилинин Г.Н. // ЖТФ. 1972. Т. XLII. Вып. 1. С. 54.
5. Ким В.П. // ЖТФ. 2015. Т. 85. Вып. 3. С. 45.
6. Arhipov B.A., Bober A.S., Gnizdor R.Y., Kozubsky K.N., Koryakin A.I., Maslennikov N.A., Pridannikov S.Yu. The Results of 7000-Hour SPT-100 Life Testing // 24th Int. Electric Propulsion Conf. M., 1995. P. IEPC-1995-039.

7. Мосунов А.С., Рыжов Ю.А., Семенов А.А., Шкарбан И.И., Коллигон Д.С., Юрасова В.Е. // Изв. РАН. Сер. физ. 2008. Т. 68. № 11. С. 1665.
8. Kim V., Abgaryan V., Dumazert P., Kozlov V., Nadiradze A., Prioul M., Svitina V. Development of Software for Numerical Simulation of the SPT Discharge Chamber Wall Erosion by the Accelerated Ions // Proc. Int. Space Propulsion Conf. Cagliari, 2004.
9. Бишаев А.М., Ким В. Исследование локальных параметров плазмы в ускорителе с замкнутым дрейфом электронов и протяженной зоной ускорения // ЖТФ. 1978. Т. 48. Вып. 9. С. 1853.
10. Бишаев А.М., Ким В. Исследование влияния конфигурации стенок канала на распределение параметров плазмы в УЗДП // Источники и ускорители плазмы. Харьков: ХАИ, 1981. Вып. 5. С. 3.
11. Ким В. Анализ закономерностей износа изолятора, ограничивающего ускорительный канал УЗДП // Источники и ускорители плазмы. Харьков: ХАИ, 1982. Вып. 5. С. 7.
12. Kim V., Abgaryan V., Kozlov V. et al. Development of the Accelerated Test Procedure for the SPT Discharge Chamber Wall Wearing during Long Thruster Operation // 39th Joint Propulsion Conf. Huntsville, 2003. P. AIAA-2003-5003.
13. Архипов А.С., Ким В.П., Сидоренко Е.К. Анализ баланса энергии в разряде стационарного плазменного двигателя по результатам измерений его интегральных параметров и характеристик струи // Вестн. МАИ. 2010. Т. 17. № 5. С. 125.

## Spatial Distribution of the Sputtered Discharge Chamber Walls Material Exhausting the Stationary Plasma Thruster

M. V. Abgaryan<sup>1</sup>, V. P. Kim<sup>1, \*</sup>, A. A. Semenov<sup>2, \*\*</sup>

<sup>1</sup>Research Institute of Applied Mechanics and Electrodynamics, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, 125080 Russia

<sup>2</sup>Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, 125080 Russia

\*e-mail: riame4@sokol.ru

\*\*e-mail: heat204@mail.ru

The methodology and results of calculating the time change in the directional pattern of the flow of material sputtered material from the walls of the discharge chamber of a stationary plasma thruster (traditional scheme) during long-term operation are presented. Calculations have shown that the maximum of the directional patterns shifts to the thruster axis towards smaller angles as the thruster operates. This occurs because of the widening due to erosion of the walls outlet parts of the thruster accelerating channel, which expands as a result of the removal of the sprayed material of these walls, which are most susceptible to ion flow irradiation.

**Keywords:** stationary plasma thruster, erosion of the walls of the accelerating channel of the discharge chamber, sputtering coefficient, sputtered material flow indicatrix, numerical simulation.