

03;04;11;12

Влияние эрозии стенок разрядного канала на эффективность работы стационарного плазменного двигателя

© А.А. Шагайда, О.А. Горшков, Д.А. Томилин

Государственный научный центр Российской Федерации — федеральное государственное унитарное предприятие „Исследовательский центр им. М.В. Келдыша“, 125438 Москва, Россия
e-mail: shagayda@gmail.com

(Поступило в Редакцию 4 августа 2011 г. В окончательной редакции 22 ноября 2011 г.)

Приведены экспериментальные исследования изменения интегральных характеристик стационарных плазменных двигателей при их длительной работе. Показано, что одной из главных причин монотонного падения тягового КПД и удельного импульса в течение первых 500–1000 ч работы является снижение коэффициента использования рабочего тела. Предложен физический механизм, объясняющий наблюдаемое явление, и получены выражения, позволяющие прогнозировать динамику изменения выходных характеристик двигателей в процессе выработки ресурса. Продемонстрировано удовлетворительное совпадение экспериментальных и расчетных данных для изменения анодного удельного импульса при ресурсных испытаниях нескольких двигателей различной мощности. Описана обнаруженная в экспериментах взаимосвязь конфигурации магнитного поля и положения границ зоны эрозии стенок разрядной камеры.

Введение

Одной из основных причин, ограничивающих ресурс плазменных ускорителей с замкнутым дрейфом электронов типа стационарных плазменных двигателей (СПД), является эрозия стенок разрядного канала, которая происходит в результате бомбардировки ионным потоком [1]. Эрозия приводит к уменьшению толщины стенок вблизи выходного среза двигателя вплоть до их полного распыления, после чего начинается распыление элементов магнитной системы. Иногда этот момент выбирают в качестве критерия для оценки ресурса, хотя, например, при проведении испытаний двигателя СПД-100 [2] было обнаружено, что двигатель способен эффективно работать длительное время и после начала ионной бомбардировки магнитных полюсов. Существует и другой фактор, который иногда считают определяющим при оценке ресурса. Во время длительной работы, как правило, наблюдается снижение параметров эффективности СПД [3,4], и поэтому ресурс можно определить как период времени, в течение которого выходные характеристики двигателя остаются в пределах заданных значений. Допустимые диапазоны таких параметров, как тяга и удельный импульс, обычно определяются из условия сохранения способности двигателя выполнять необходимую баллистическую задачу.

До настоящего времени рассматривались две возможные причины снижения эффективности СПД по мере выработки ресурса. Во-первых, это запыление элементов анода и разрядного канала продуктами распыления [4,5]. Образующиеся пленки влияют на характер взаимодействия плазмы со стенками разрядного канала и изменяют величину прианодного падения потенциала. Кроме того, время от времени происходит отслаивание пленок, которое сопровождается неустойчивой работой

двигателя, повышением тока разряда и увеличением тепловых потерь. Однако, если в ходе ресурсных испытаний периодически очищать разрядный канал от пленок, наблюдается кратковременное улучшение параметров, но эффективность работы двигателя, очищенного от пленок, остается ниже, чем в начале испытаний. Поэтому запыление является не единственной причиной снижения КПД и удельного импульса. Вторая причина состоит в изменении параметров плазмы по мере того, как в результате эрозии изменяется геометрия стенок разрядного канала. Чаще всего ухудшение эффективности объясняют тем, что эрозия приводит к увеличению площади сечения канала, в результате чего снижаются плотность плазмы и объемная скорость образования ионов, хотя количественные оценки этого эффекта, насколько известно авторам, не проводились. Такое объяснение представляется недостаточно убедительным, так как наиболее сильному распылению подвержена выходная часть разрядного канала, в которой скорость ионизации сравнительно мала и происходит, главным образом, ускорение ионного потока [1]. В то же время зона наиболее интенсивной ионизации, где снижение плотности плазмы могло бы оказать заметное влияние на скорость объемного ионообразования, расположена ближе к аноду, т.е. там, где площадь сечения канала увеличивается незначительно.

В настоящей работе рассмотрена модель процесса ионизации в разряде СПД, учитывающая форму стенок разрядного канала, и на ее основе впервые получены соотношения, позволяющие проводить количественную оценку изменения коэффициента использования рабочего тела по мере выработки ресурса. Результаты расчетов сравниваются с данными, полученными при проведении ресурсных испытаний четырех различных СПД с номинальной мощностью от 200 W до 1.5 kW.

Характер изменения параметров СПД в процессе выработки ресурса

Основными параметрами, характеризующими эффективность работы СПД, являются анодный КПД

$$\eta_a = R^2 / 2m_a N_d \quad (1)$$

и анодный удельный импульс

$$I_{spa} = R / m_a g, \quad (2)$$

где R — тяга, m_a — массовый расход рабочего тела, поступающего в разрядный канал анодного блока (если часть рабочего тела подается в катод, то при расчете анодных параметров она не учитывается), N_d — мощность разряда, g — ускорение свободного падения. При анализе эффективности работы двигателя эти параметры удобно представить в виде произведения нескольких коэффициентов [6], описывающих различные виды потерь. Потери, связанные с неполной ионизацией атомов рабочего газа, характеризуются коэффициентом использования рабочего тела

$$\eta_m = \frac{m_i}{m_a}, \quad (3)$$

где m_i — массовый поток ионов в ускоренной плазменной струе.

Коэффициент

$$\eta_j = \frac{J_i}{J_d}, \quad (4)$$

где J_d — ток разряда, J_i — ток ионов, описывает затраты на поддержание электронного тока, равного разности ($J_d - J_i$).

Потери тяги, связанные с угловым и энергетическим распределениями ионов в плазменной струе, характеризуются коэффициентом η_U , который равен отношению реальной тяги к идеальной, которую создавали бы истекающие из двигателя ионы, если бы все они двигались параллельно оси двигателя и имели одинаковую энергию, соответствующую напряжению разряда.

Если пренебречь наличием в плазменной струе ионов различной кратности, анодный КПД двигателя можно представить в виде

$$\eta_a = \eta_m \eta_j \eta_U^2, \quad (5)$$

а анодный удельный импульс

$$I_{spa} = \eta_m \eta_U \sqrt{2eU_d / M g^2}, \quad (6)$$

где e — заряд, M — масса иона, U_d — напряжение разряда.

При проведении ресурсных испытаний СПД, имеющих различные размеры и номинальные значения мощности [3,7,8], наблюдались монотонные снижения КПД и удельного импульса. В ходе этих испытаний измерялись тяга двигателя и параметры плазменной струи, включая

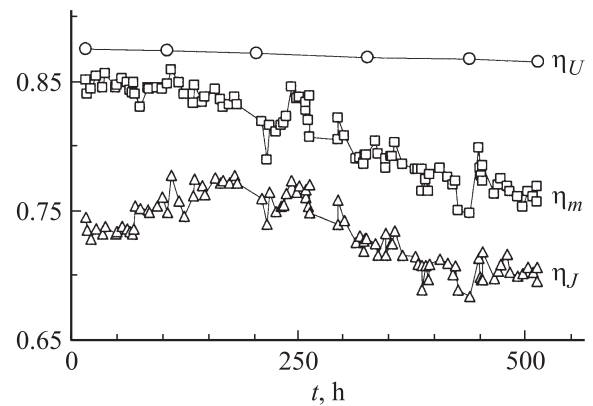


Рис. 1. Изменение безразмерных параметров эффективности СПД в течение первых 500 h работы.

энергетические и угловые распределения ионов, после чего по методике, описанной в [6], рассчитывались отдельные компоненты коэффициентов эффективности. Было обнаружено, что для всех двигателей в течение первых 500–1000 h работы коэффициент η_U практически не изменялся, коэффициент η_j уменьшался приблизительно на 3–5%, а наиболее заметному снижению (до 10%) был подвержен коэффициент использования рабочего тела. Типичный вид зависимости этих коэффициентов от времени показан на рис. 1 (приведенные на рисунке данные были получены во время ресурсных испытаний СПД мощностью 900 W, работавшего при напряжении разряда 500 V в течение 500 h). Как видно из графика, изменение коэффициента использования рабочего тела η_m фактически является единственной причиной снижения анодного удельного импульса и наиболее важной причиной снижения КПД. Поэтому далее рассмотрим факторы, которые влияют на величину этого коэффициента и могут претерпевать изменения во время выработки ресурса.

Оценка величины коэффициента использования рабочего тела

Схема разрядного канала СПД показана на рис. 2. Согласно имеющимся экспериментальным данным и результатам численного моделирования, основное падение потенциала в разряде сосредоточено в области максимального магнитного поля, а в области с максимальной скоростью ионизации потенциал плазмы сравнительно высок и близок к потенциалу анода. Условно область разряда можно разделить на две зоны — ионизации и ускорения. В первой зоне происходит ионизация нейтральных атомов, поступающих в разрядную камеру со стороны анода. Во второй зоне объемная скорость ионизации существенно ниже, поэтому при упрощенном рассмотрении можно считать, что в ней происходит только ускорение ионов.

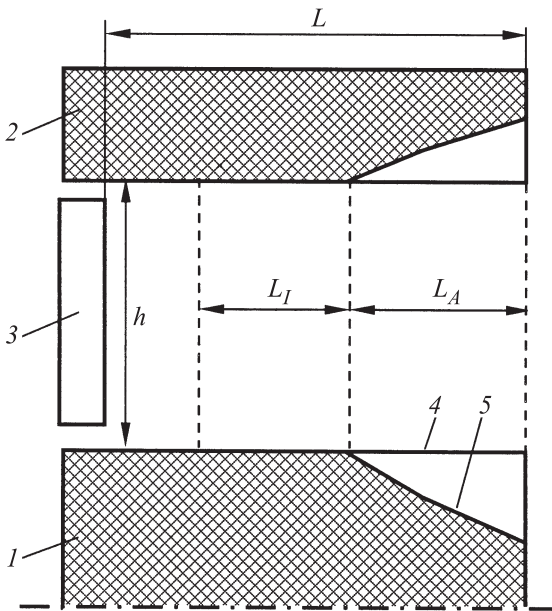


Рис. 2. Схема разрядного канала СПД: 1 — внутренняя стенка, 2 — наружная стенка, 3 — анод-газораспределитель, 4 — внутренняя стенка до начала работы двигателя, 5 — поверхность стенки после распыления.

Главным параметром, определяющим величину коэффициента использования рабочего тела, является длина пробега нейтрального атома до ионизации

$$\lambda_i = V_a / \beta_i n_e, \quad (7)$$

где V_a — характерная тепловая скорость нейтральных атомов, n_e — средняя концентрация электронов в области ионизации, $\beta_i \equiv \langle \sigma_i v_e \rangle$ — произведение сечения ионизации на скорость электронов, усредненное по функции распределения электронов по скоростям. Отношение этой длины к длине разрядного канала L в [9] было определено как критерий подобия процессов в СПД, а условие

$$\frac{\lambda_i}{L} \ll 1 \quad (8)$$

принято считать необходимым для эффективной работы двигателя.

Неудобство практического применения критерия (8) связано с тем, что фактическая длина области ионизации не равна длине разрядного канала. Эксперименты показывают, что если расстояние от анода до выходного среза двигателя больше ширины канала h и характерной длины изменения магнитного поля в направлении анода, то на эффективность работы СПД оно практически не влияет. Поэтому при выводе оценочного выражения для коэффициента использования рабочего тела вместо длины разрядного канала L будем использовать некоторую условную длину зоны ионизации L_I , считая, что при фиксированном магнитном поле эта длина не изменяется. В работе [10] отмечалось, что для оценок можно приближенно принять $L_I \approx h$ и что это объясняется

конфигурацией магнитного поля в СПД. Фактически этот вывод явился констатацией наблюдаемой в экспериментах и подтвержденной результатами численного моделирования закономерности, состоящей в том, что характерный размер области, в которой происходит интенсивная ионизация, определяется не длиной разрядного канала, а распределением магнитного поля. Область ионизации расположена там, где происходит наиболее быстрое уменьшение магнитного поля в направлении от выходного среза к аноду [11]. При этом характерный масштаб расстояния, на котором изменяется магнитное поле, имеет порядок ширины канала, что и приводит к оценке $L_I \approx h$.

Если не учитывать потери ионов на стенках, коэффициент использования рабочего тела можно рассчитать как вероятность того, что атом, двигаясь через область длиной L_I , будет в ней ионизован:

$$\eta_m = 1 - \exp\left(-\frac{L_I}{\lambda_i}\right) = 1 - \exp\left(-\frac{L_I \beta_i n_e}{V_a}\right). \quad (9)$$

Чтобы оценить характерное значение концентрации электронов, воспользуемся условием квазинейтральности $n_e \approx n_i$, а концентрацию ионов n_i оценим, разделив плотность потока ионов j_i на их заряд и скорость, которую они приобретают в области ионизации с перепадом потенциала $\Delta\phi_I$:

$$n_i \approx j_i / e V_i \approx \frac{j_i}{e} \sqrt{\frac{M}{2e\Delta\phi_I}}. \quad (10)$$

По определению коэффициент использования рабочего тела равен отношению потока ионов, выходящих из двигателя, к потоку нейтрального газа, подаваемого через анод-газораспределитель, поэтому плотность тока ионов можно записать в виде

$$j_i = \eta_m j_a = \eta_m \frac{e}{M} \frac{m_a}{S_c}, \quad (11)$$

где j_a — эквивалентная плотность тока атомов рабочего тела, S_c — площадь сечения канала в области ионизации. Из (9)–(11) получаем уравнение для коэффициента использования рабочего тела

$$\eta_m = 1 - \exp(-\gamma m_a \eta_m), \quad (12)$$

где введено обозначение

$$\gamma = \frac{\beta_i L_I}{V_a S_c \sqrt{2eM\Delta\phi_I}}. \quad (13)$$

Это уравнение имеет решение

$$\eta_m = 1 + \frac{W_0(-\gamma m_a e^{-\gamma m_a})}{\gamma m_a}, \quad (14)$$

где W_0 является W -функцией Ламберта [12]. Вместо (14) для оценок можно использовать аппроксимирующее выражение

$$\eta_m \cong 1 - \exp\left[-\frac{3}{2}(\gamma m_a - 1)\right], \quad (15)$$

которое в диапазоне практически важных значений $\eta_m > 0.8$ обеспечивает относительную погрешность не выше 1%.

Сделанная оценка получена, исходя из предположения об отсутствии потерь ионов на стенках разрядного канала. В реальных условиях электрическое поле в разряде СПД неоднородно [13], т.е. наряду с осевой имеет и радиальную составляющую, и поэтому часть ионов попадает на стенки канала. Эти потери в принципе можно было бы учесть, вводя в рассмотрение вместо величины L_l более короткую эффективную длину зоны ионизации, тем более что само понятие „длина зоны ионизации“ при непрерывном распределении параметров плазмы по длине канала имеет условный характер. Однако уменьшение количества ионов в ускоренной плазменной струе является не единственным следствием их попадания на стенку. Столкнувшись со стенкой, ионы рекомбинируют и возвращаются в канал в виде нейтральных атомов, которые могут быть повторно ионизованы. Зондовые измерения показывают, что плотность тока ионов на стенки канала по величине сравнима с плотностью тока ионов в ускоренном пучке, а полный поток ионов на стенки соизмерим с потоком атомов рабочего тела, поступающим в двигатель из газораспределителя. Так, например, в СПД PPS-1350 при средней плотности тока ионов в выходном сечении разрядного канала, составлявшей $60\text{--}70\text{ мА/см}^2$, измеренный максимум плотности тока ионов на наружной стенке канала достигал 40 мА/см^2 , а суммарный поток ионов на обе стенки канала по оценкам авторов составлял около 45% от потока рабочего тела, подаваемого в анодный блок СПД [11]. Следовательно, стенки канала являются интенсивным источником нейтральных атомов, который необходимо принимать во внимание при расчете коэффициента использования рабочего тела. Это можно сделать, если в выражении (14) к потоку атомов из анода газораспределителя m_a добавить поток, поступающий в разряд со стенок канала.

Важно отметить, что распределения плотности тока ионов по длине стенки, измеренные в [11] при различных режимах работы двигателя, были неоднородны и имели максимум, расположенный вблизи выходного среза двигателя примерно там же, где было зарегистрировано основное падение потенциала плазмы и где обычно наблюдается эрозия стенок, т.е. происходит изменение геометрии канала. Учитывая, что при изменении формы стенок также изменяется среднее направление потока отраженных от них атомов, можно предположить следующий механизм снижения выходных характеристик по мере выработки ресурса. Скорости нейтральных атомов при диффузном отражении от стенки распределены симметрично относительно нормали к поверхности. Если в начальном состоянии поверхности стенок канала имеют цилиндрическую форму (рис. 2), то вероятность отразиться в направлении анода и повторно попасть в область ионизации близка к вероятности отразиться в направлении выхода из разрядного канала и покинуть двигатель в виде нейтрального атома. В результате ионного распыления в выходной части разрядного канала появляется расширение и стенки приобретают наклон в сторону среза двигателя. При этом убывает вероятность

того, что отраженный нейтральный атом будет двигаться в направлении анода. В результате увеличивается поток нейтральных атомов, безвозвратно покидающих разрядный канал, т.е. снижается коэффициент использования рабочего тела.

Представим величину добавочного потока атомов в виде $\Delta m_w = m_w P_r$, где m_w — массовый поток атомов, отраженных от стенок канала в области, где стенки подвержены эрозии, P_r — параметр, характеризующий усредненную по этой области вероятность того, что атом, отраженный от стенки, будет двигаться в направлении анода. Подставляя эту величину в (14), получим

$$\eta_m = 1 + \frac{W_0(-ae^{-a})}{a}, \quad (16)$$

где $a = \gamma(m_a + m_w P_r)$.

Для выяснения вопроса о том, насколько важную роль описанный механизм играет в снижении параметров эффективности СПД, необходимо сравнить рассчитанные по формуле (16) и наблюдаемое в экспериментах изменение коэффициента использования рабочего тела.

Метод анализа экспериментальных данных

При проведении всех ресурсных испытаний, результаты которых анализируются в настоящей работе, коэффициент использования рабочего тела рассчитывался при помощи метода, описанного в [6], по измеренным значениям тяги, расхода рабочего тела в анодный блок и параметрам плазменной струи. Наряду с этим периодически проводились измерения профиля стенок разрядного канала с целью оценки скорости их износа. В настоящей работе эти данные были использованы для расчета изменения параметра P_r в процессе выработки ресурса. Метод расчета состоял в следующем. В качестве расчетной области выбиралась часть разрядного канала, ограниченная в радиальном направлении поверхностями стенок, а в осевом направлении — плоскостями, перпендикулярными оси двигателя и ограничивающими зону, в которой наблюдается эрозия стенок (область длиной L_A на рис. 2). Границы, соответствующие стенкам канала, разбивались на ряд узлов, и в свободномолекулярном приближении рассчитывалось движение нейтральных атомов, испускаемых из узлов с начальными скоростями, имеющими максвелловское распределение. На стенках канала задавался диффузный закон отражения. Границы расчетной области, перпендикулярные оси двигателя, считались прозрачными. Для каждого узла вычислялось отношение потока частиц, выходящих из расчетной области в направлении анода, к полному количеству испускаемых из узла частиц. Значение коэффициента P_r вычислялось путем усреднения этого отношения по всем расчетным узлам на поверхностях стенок. Такие вычисления были проведены для всех моментов времени, для которых имелись данные о профиле стенок.

Отметим, что в двигателях рассматриваемого типа высота канала обычно больше, чем длина области, в которой происходит эрозия стенок, и количество повторных отражений атома от стенок, до того как он покинет расчетную область, было невелико. Поэтому, как показали дальнейшие расчеты, для приближенных оценок без заметной потери точности можно считать, что вероятность вернуться в область ионизации для атомов, испускаемых из заданного узла, равна вероятности того, что начальная скорость атома будет иметь осевую компоненту, направленную в сторону анода. Нетрудно показать, что при диффузном законе испускания атомов эта вероятность определяется выражением $(1 - \sin \alpha)/2$, где α — угол наклона образующей поверхности стенки к оси разрядного канала.

Значение γ оценить довольно сложно, однако есть основания предполагать, что в процессе выработки ресурса оно изменяется слабо. Как мы уже отмечали, длина зоны ионизации, входящая в коэффициент γ , определяется главным образом конфигурацией магнитного поля. Известно также, что на положение и длину области ионизации при фиксированном напряжении разряда и расходе рабочего тела оказывают влияние величина и конфигурация магнитного поля. Поэтому можно предположить, что в периоды времени, когда магнитное поле остается неизменным, эффективная длина области ионизации также не изменяется. Величина скорости ионизации β_i , входящая в выражение для коэффициента γ , зависит от температуры электронов, которая, в свою очередь, определяется главным образом напряжением разряда и коэффициентом вторичной электрон-электронной эмиссии материала, из которого сделаны стенки разрядного канала, т.е. параметрами, которые при работе двигателя остаются постоянными [14]. Судить о том, насколько сильно изменяется поток ионов на стенки m_w по мере выработки ресурса, довольно сложно. Авторам неизвестны работы, посвященные изучению этого вопроса. Поэтому далее будем только предполагать постоянство величины m_w , а степень соответствия экспериментальных и расчетных данных будет служить косвенным подтверждением или опровержением правильности сделанных предположений.

С учетом сказанного будем считать, что в уравнении (16) два неизвестных параметра γ и m_w незначительно изменяются в результате распыления стенок разрядного канала и что основной величиной, определяющей снижение эффективности работы двигателя, является параметр P_r . Поэтому если измерить эффективность использования рабочего тела и профили стенок разрядного канала в два различных момента времени, то, составляя из (16) систему двух уравнений, можно рассчитать значения этих параметров:

$$m_w = \frac{m_{a2}Q_1 - m_{a1}Q_2}{P_{r1}Q_2 - P_{r2}Q_1}, \quad \gamma = \frac{P_{r2}Q_1 - P_{r1}Q_2}{m_{a2}P_{r1} - m_{a1}P_{r2}}, \quad (17)$$

где цифровые индексы обозначают номер измерения и для сокращения записи введено обозначение $Q =$

$[\ln(1 - \eta_m)]/\eta_m$. Используя данные о профилях стенок разрядного канала в последующие моменты времени, по формуле (16) можно рассчитать значения эффективности использования рабочего тела и сравнить их с измеренными значениями.

Результаты ресурсных испытаний

Анализ результатов ресурсных испытаний был проведен для четырех СПД — КМ-32, КМ-60Б, КМ-60Н и КМ-88, отличающихся мощностью, напряжением разряда и материалом стенок разрядного канала. Рабочим телом во всех экспериментах был ксенон.

Двигатель КМ-32 [3] с разрядным каналом, изготовленным из керамики BN-05, являющейся композицией нитрида бора (85–93%) и оксида бора (6–14%), испытывался при напряжении разряда 250 В и мощности 200 Вт в течение 500 ч. Две модификации двигателя серии КМ-60 испытывались при напряжении разряда 500 В и мощности 900 Вт. Первая модификация КМ-60Б, в которой разрядный канал был изготовлен из керамики БГП-10 (композиция 60% нитрида бора и 40% оксида кремния), испытывался в течение 500 ч, вторая — КМ-60Н с керамикой BN-05 в течение 1000 ч. Двигатель КМ-88 [8] с керамикой БГП-10 прошел ресурсные испытания в течение 500 ч при напряжении разряда 500 В и мощности 1600 Вт.

При проведении всех испытаний напряжение и ток разряда поддерживались постоянными. Постоянство тока разряда обеспечивалось регулировкой расхода рабочего тела в анодный блок. Измерения параметров плазменной струи для расчета коэффициентов эффективности проводились при помощи трехсеточных зондов с задерживающим потенциалом. Полученные результаты продемонстрированы на рис. 3. В трех из представленных четырех серий испытаний величину тока в магнитных катушках по мере выработки ресурса приходилось изменять. Это связано с тем, что чаще всего оптимальный режим двигателя, при котором обеспечиваются наиболее высокие значения КПД и удельного импульса, в начальный период работы СПД достигается при более сильном магнитном поле. По мере износа стенок разрядного канала режим работы двигателя изменяется, иногда разряд становится неустойчивым, наблюдаются всплески тока разряда и видимые глазом изменения формы и яркости плазменной струи. В этом случае обеспечить стабильную работу двигателя удастся путем некоторого снижения тока в магнитных катушках. Как правило, это приводит к некоторому снижению параметров эффективности, которое не связано напрямую с исследуемыми в настоящей работе процессами изменения уровня потерь нейтральных частиц, отраженных от стенок канала. Наиболее вероятной причиной такого поведения разряда является увеличение пробочного соотношения магнитного поля в зоне ионизации [15], вызванное расширением канала, и затруднение транспорта электронов, которое удастся восстановить путем снижения магнитного поля,

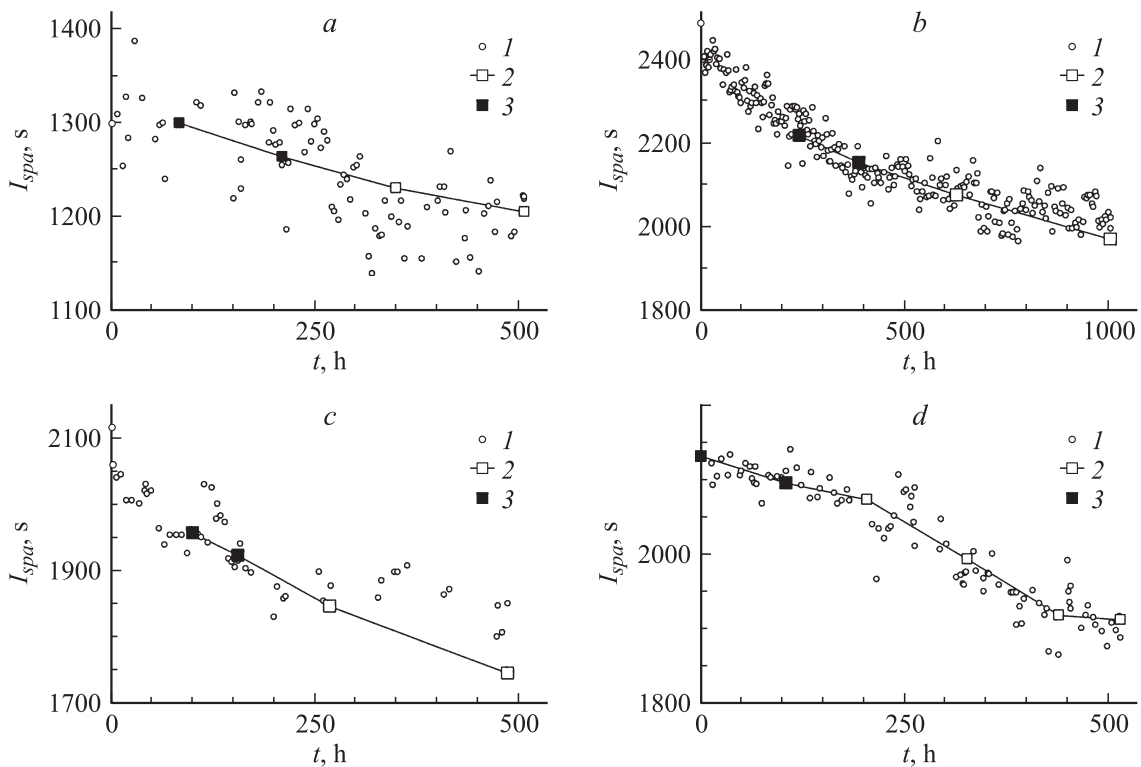


Рис. 3. Изменение анодного удельного импульса двигателей КМ-32 (а), КМ-88 (б), КМ-60Б (с) и КМ-60Н (д) в ходе ресурсных испытаний: 1 — экспериментальные данные, 2 — результат расчета, 3 — точки, использованные для расчета значений γ и m_w .

что в свою очередь влияет на проводимость в объеме плазмы. Как отмечалось выше, регулировка величины магнитного поля может приводить к изменению положения и длины зоны ионизации, поэтому все расчеты, представленные на рис. 3, были сделаны для тех периодов испытаний, когда магнитное поле поддерживалось постоянным.

Можно видеть, что значения анодного удельного импульса, измеренные в ходе испытаний, оказались близки к результатам расчетной оценки. Отсюда можно заключить, что рассмотренный механизм увеличения потерь рабочего тела, скорее всего, является одним из главных, определяющих общее снижение эффективности СПД по мере выработки ресурса. Это также служит косвенным подтверждением сделанных предположений о сравнительно слабом изменении параметров γ и m_w при распылении стенок разрядного канала.

Отметим, что в ходе экспериментов с различными СПД была обнаружена закономерность, которая позволяет оценить положение границ зон распыления на внутренней и наружной стенках разрядного канала, анализируя конфигурацию магнитного поля, т.е. еще на этапе проектирования магнитной системы двигателя. Ранее при попытках найти критерий оптимальности конфигурации магнитного поля в СПД [15] была рассмотрена скалярная функция

$$F = \left| \frac{\mathbf{B} \times \nabla |B|}{|\mathbf{B}|} \right|,$$

которая характеризует проекцию градиента абсолютной величины магнитного поля на нормаль к силовой линии. Отмечалось, что область максимума этой функции находится примерно там же, где располагается область с наивысшей объемной скоростью образования ионов при численном моделировании плазмы в канале СПД. Это позволило предположить, что именно магнитное поле является главным фактором, определяющим положение границ эрозии разрядного канала.

При проведении ресурсных испытаний двигателей КМ-32, КМ-60Б, КМ-60Н и КМ-88 измерялись профили поверхностей стенок канала и положения границ зон эрозии сравнивались с положением максимума функции F . Полученные результаты продемонстрированы на рис. 4. На диаграммах показаны магнитные силовые линии и линии равного уровня функции F для всех испытаний двигателей. Также показаны зоны распыления внутренней и внешней стенок разрядного канала. Анализируя представленные данные, можно заметить, что на всех диаграммах точка, в которой функция F имеет максимум, расположена между двумя магнитными силовыми линиями (на рисунке жирные линии), проходящими через границы зон распыления внутренней и наружной стенок канала. Обнаруженная корреляция представляется полезной с точки зрения оценки влияния различных конструктивных изменений магнитной системы и разрядного канала на ресурсные характеристики СПД.

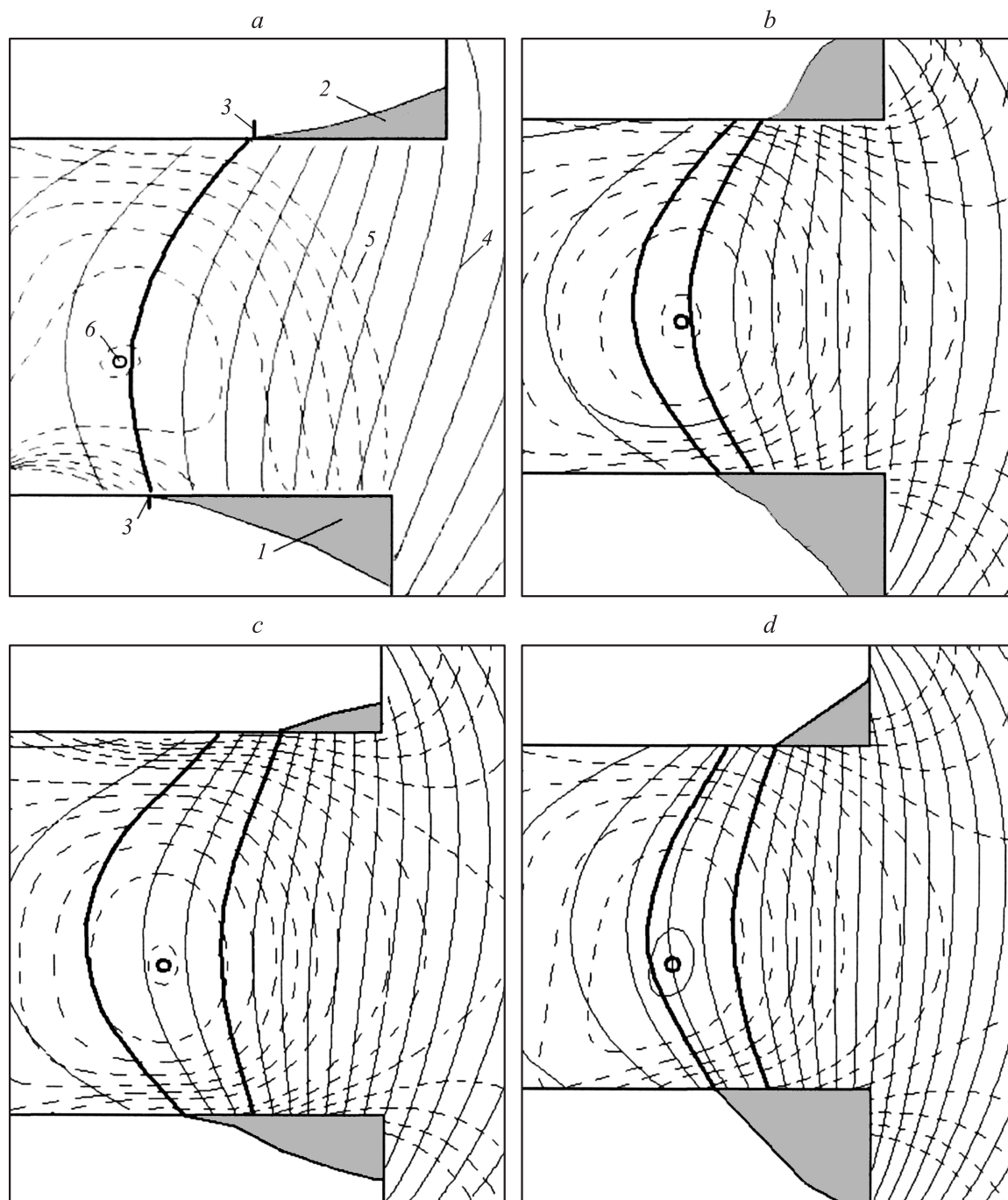


Рис. 4. Зоны эрозии стенок разрядного канала и конфигурация магнитного поля в двигателях КМ-32 (а), КМ-88 (b), КМ-60Б (c) и КМ-60Н (d): 1 — область эрозии внутренней стенки, 2 — область эрозии наружной стенки, 3 — границы зон эрозии, 4 — силовые линии магнитного поля, 5 — линии постоянного уровня функции F , 6 — точка максимума функции F .

Заключение

Предложена физическая модель и получено соотношение, позволяющее проводить количественную оценку снижения коэффициента использования рабочего тела и анодного удельного импульса СПД, происходящих при изменении формы стенок разрядного канала в результате ионного распыления. Суть явления состоит в том, что изменение формы стенок канала приводит

к увеличению доли нейтральных атомов, отраженных от стенок канала и покидающих область разряда, не испытывающих повторной ионизации. Сравнение расчетных и экспериментальных данных показывает хорошее совпадение, что позволяет говорить о том, что рассмотренный механизм, возможно, является одним из основных, ответственных за снижение выходных характеристик СПД на начальном этапе ресурсных испытаний ($\sim 500-1000$ h).

Список литературы

- [1] *Kim V.* // J. Prop. Power. 1998. Vol. 14. P. 736–743.
- [2] *Arhipov B.A., Bober A.S., Gnizdor R.Y.* et al. // Proc. of the 24th Int. Electric Propulsion Conf. Moscow, 1995. P. 315–321.
- [3] *Беликов М.Б., Горшков О.А., Дышлок Е.Н.* и др. // Косм. ракетостр. 2008. Вып. 3. С. 131–141.
- [4] *Dumazert P., Lagardère-Verdier S.* // Proc. of the 3rd Intern. Conf. on Spacecraft Propulsion. Cannes, France, 2001. P. 341–350.
- [5] *Dorf L., Raitses Y., Fisch N.J., Semenov V.* // Appl. Phys. Lett. 2004. Vol. 84. P. 1070–1072.
- [6] *Горшков О.А., Шагайда А.А.* // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. Вып. 4. С. 37–43.
- [7] *Горшков О.А., Муравлев В.А., Шагайда А.А.* // Косм. ракетостр. 2008. Вып. 3. С. 142–155.
- [8] *Беликов М.Б., Горшков О.А., Ловцов А.С., Шагайда А.А.* // Прикладная физика. 2008. № 3. С. 59–62.
- [9] *Морозов А.И., Меликов И.В.* // ЖТФ. 1974. Т. 44. Вып. 3. С. 544–548.
- [10] *Бугрова А.И., Масленников Н.А., Морозов А.И.* // ЖТФ. 1991. Т. 61. Вып. 6. С. 45–51.
- [11] *Kim V., Kozlov V.I., Skrylnikov A.I.* et al. // Proc. of the 29th Int. Electric Propulsion Conf. Princeton, 2005. IEPС-2005-004.
- [12] *Дубинов А.Е., Дубинова И.Д., Сайков С.К.* W-функция Ламберта и ее применения в математических задачах физики. Саров, 2006. 160 с.
- [13] *Choueiri E.* // Phys. Plasmas. 2001. Vol. 8. N 4. P. 1411–1426.
- [14] *Staack D., Raitses Y., Fisch N.J.* // Appl. Phys. Lett. 2004. Vol. 84. N 16. P. 3028–3030.
- [15] *Горшков О.А., Шагайда А.А.* // ТВТ. 2008. Т. 46. № 4. С. 582–587.