

03:04

Исследование возможности вынесения слоя ионизации и ускорения за пределы плоскости полюсов магнитной системы стационарного плазменного двигателя Морозова

© В.П. Ким¹, Р.Ю. Гниздор², Д.П. Грдличко¹, В.С. Захарченко¹,
Д.В. Меркурьев¹, О.А. Митрофанова², П.Г. Смирнов¹,
Е.А. Шилов¹

¹ Научно-исследовательский институт прикладной механики и электродинамики

Московского авиационного института (Национального исследовательского университета), Москва, Россия

² Опытное конструкторское бюро „Факел“, Калининград, Россия
E-mail: iame4@sokol.ru

Поступило в Редакцию 28 мая 2018 г.

В связи с расширением применения стационарных плазменных двигателей Морозова требования к ним возрастают. Поэтому в России и за рубежом предпринимаются попытки улучшения организации рабочих процессов в них с целью повышения их характеристик и ресурса. Анализ возможностей решения этой проблемы показывает, что перспективным является полное вынесение слоя ионизации и ускорения в выходном направлении за пределы плоскости полюсов магнитной системы двигателя. Это позволит снизить потоки ускоренных ионов на стенки разрядной камеры, защищающих указанные элементы магнитной системы, уменьшить соответствующие потери энергии и скорость эрозии стенок вследствие их бомбардировки ускоренными ионами. Представлено подтверждение практической реализуемости рассмотренной возможности.

DOI: 10.21883/PJTF.2018.23.47020.17408

Стационарные плазменные двигатели (СПД) Морозова успешно используются в космической технике, и их применение расширяется. Спецификой современных СПД является то, что основная ионизация потока рабочего вещества (РВ), движущегося в ускорительном канале, и ускорение образовавшихся ионов происходит в достаточно узком слое иони-

зации и ускорения (СИУ). Поэтому одной из возможностей значительного улучшения характеристик двигателя является вынесение СИУ в выходном направлении, по крайней мере за пределы плоскости полюсов магнитной системы двигателя, что создает предпосылки для реализации полного вынесения СИУ из конструкции двигателя [1,2]. Одной из таких возможностей, активно прорабатываемой в настоящее время в России и за рубежом [3,4], является так называемая „магнитная защита“ стенок, при реализации которой удастся кардинально снизить эрозию стенок, и можно рассчитывать на то, что будет достигнут очень большой ресурс двигателя [3]. Следует отметить, что основной причиной такого снижения скорости эрозии является смещение СИУ в выходном направлении, при котором граница СИУ со стороны анода в режимах работы с магнитной защитой смешается примерно в плоскость полюсов (рис. 1, *a*).

Недостатком упомянутого способа магнитной защиты стенок является то, что в силу необходимости расширения канала выходная часть стенок ускорительного канала должна иметь незначительную толщину (рис. 1, *a*). Кроме того, область плазмы с повышенным потенциалом оказывается приближенной к полюсам магнитной системы. Поэтому в выполненных разработках моделей СПД с магнитной защитой стенок происходит заметное распыление по крайней мере одного из полюсов магнитной системы [3,5], и приходится использовать их дополнительную защиту. С учетом изложенного авторы настоящей работы предпочитают развитие СПД по традиционному направлению, которое использовалось при разработке современных СПД. Оно сводилось к смещению СИУ в выходном направлении за счет соответствующего смещения области максимальных значений магнитной индукции, к которой „привязан“ СИУ [1]. Так, в наиболее широко используемом в космосе двигателе СПД-100 удалось вынести примерно половину СИУ за пределы плоскости полюсов, снизить суммарные потери ускоренных ионов на стенках, повысить тяговую эффективность выше 50% и получить ресурс двигателя более 9000 h [1]. С учетом изложенного авторами продолжена работа в традиционном направлении с целью получения максимального вынесения СИУ за счет решения следующих задач [2].

1. Больше, чем в СПД-100, вынесение максимума распределения магнитной индукции вдоль ускорительного канала за пределы плоскости полюсов магнитной системы, позволяющее максимально сдвинуть СИУ в выходном направлении, используя привязку СИУ к области максимальных значений индукции магнитного поля.

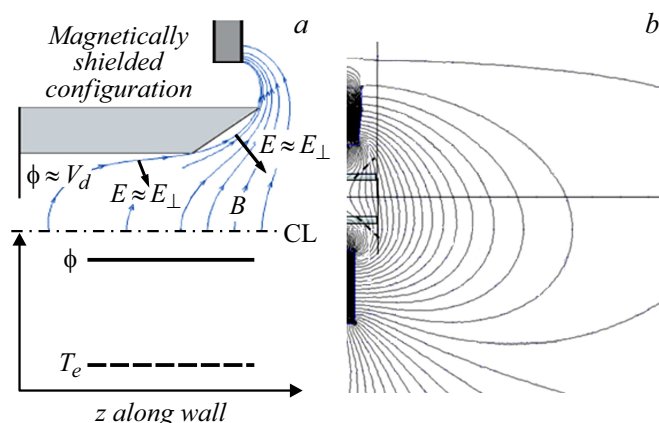


Рис. 1. Конфигурации выходной части ускорительного канала и силовых линий магнитного поля в двигателе с магнитной защитой стенок (*a*) и в двигателе с традиционным смещением СИУ в выходном направлении (*b*). ϕ — потенциал плазмы, V_d — разрядное напряжение, E , E_{\perp} — напряженности электрического поля, B — индукция магнитного поля, T_e — температура электронов, CL — линия через центр канала.

2. Выполнение расширенной выходной части ускорительного канала (начиная примерно от плоскости полюсов магнитной системы) и подбор режима работы двигателя, при котором удалось бы разместить СИУ и зоны эрозии стенок полностью в расширенной части ускорительного канала.

Для решения первой из поставленных задач было проведено дополнительное исследование возможностей магнитных систем СПД и разработан вариант, позволяющий получить большее, чем в двигателе СПД-100, относительное смещение максимума продольного распределения магнитной индукции на срединной поверхности ускорительного канала (рис. 1, *b*, где условный срез канала размещен в сечении с максимальной индукцией).

Для решения второй задачи был проведен анализ возможности уменьшения толщины СИУ за счет увеличения расхода рабочего вещества (ксенона) через ускорительный канал. Дело в том, что в работе [6] было установлено, что значительное влияние на границы зон эрозии со стороны анода оказывает плотность расхода ксенона. Полученный

результат можно объяснить тем, что в соответствии с известной формулой Жарина $L \approx R_{eL}(\Delta U)\sqrt{v_e/v_i}$ для толщины L слоя, формирующегося в разряде со скрещенными электрическим и магнитным полями при наличии ионизации в нем [7], частота ионизационных столкновений электронов с нейтральными атомами $\nu_i = \langle \sigma_i V_e \rangle n_a$ и концентрация нейтральных атомов n_a прямо влияют на величину L . Поскольку концентрацию атомов можно в первом приближении считать пропорциональной плотности расхода РВ в ускорительном канале, выбор в [6] плотности расхода РВ в качестве одного из определяющих параметров слоя является оправданным.

В работе [6] было обнаружено также, что границы зон эрозии на разных стенках находятся в точках пересечения стенок одной и той же „граничной“ магнитной силовой линией (ГМСЛ), а значения магнитной индукции в точках пересечения ГМСЛ со срединной поверхностью ускорительного канала (СПУК) укладываются на единую зависимость от плотности расхода ксенона через ускорительный канал для всего семейства двигателей ОКБ „Факел“, успешно работающих в космосе [1]. Ионы на границах зон эрозии имеют незначительные энергии (20–30 eV), соответствующие порогу распыления материала стенки. Следовательно, потенциал в точке пересечения ГМСЛ с СПУК должен быть близок к потенциалу на границе СИУ со стороны анода. Поэтому названную точку пересечения ГМСЛ с СПУК можно считать находящейся на границе СИУ со стороны анода. Это позволило с использованием распределений магнитной индукции для выбранных двигателей и данных работы [6] определить границы СИУ со стороны анода для всего упомянутого семейства двигателей ОКБ „Факел“, работающих в разных режимах.

Для определения выходной границы СИУ было принято, что она располагается в области спадающего магнитного поля (где электронная проводимость высока [2]) в точке, где этот спад становится заметным (для расчетов было принято сечение, в котором магнитная индукция составляла 0.95 от максимального значения на срединной поверхности). Это с учетом результатов определения границ СИУ со стороны анода позволило рассчитать зависимость толщины СИУ, отнесенной к ширине канала, от плотности расхода ксенона для указанного семейства двигателей. Использование относительной толщины определяется тем, что в двигателях разного масштаба с одинаковыми типами магнитной системы картина силовых линий магнитного поля, определяющая форму магнитных силовых линий (форму линзы) в области расположения СИУ,

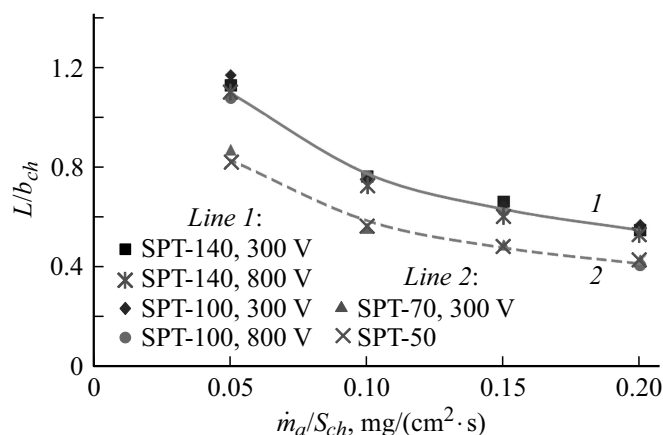


Рис. 2. Зависимость относительной толщины СИУ от плотности расхода ксенона через ускорительный канал для семейства двигателей ОКБ „Факел“ (линиями 1 и 2 показаны зависимости $L/b_{ch} = C/\sqrt{\dot{m}_a/S_{ch}}$).

изменяется в первом приближении пропорционально масштабу модели, который может задаваться шириной канала b_{ch} . Полученные данные (рис. 2) свидетельствуют о том, что для пар двигателей (СПД-50, СПД-70 и СПД-100, СПД-140) с одинаковыми типами магнитной системы получаются одинаковые зависимости относительной толщины СИУ, совпадающие с зависимостями, следующими из упомянутой ранее формулы Жаринова при $C = \text{const}$, т. е.

$$\frac{L}{b_{ch}} = \frac{C}{\sqrt{\dot{m}_a/S_{ch}}}, \quad (1)$$

где константа C изменяется при переходе от двигателей с одним типом магнитной системы к двигателям с другим типом магнитной системы, а \dot{m}_a , b_{ch} , S_{ch} — соответственно расход ксенона, ширина и площадь поперечного сечения канала.

Отмеченный результат подтверждает то, что основными факторами, определяющими толщину слоя, являются плотность расхода рабочего газа и топология магнитного поля, зависящая от типа магнитной системы. Важно также то, что с увеличением плотности расхода можно уменьшить толщину слоя в одном двигателе почти вдвое (рис. 2).

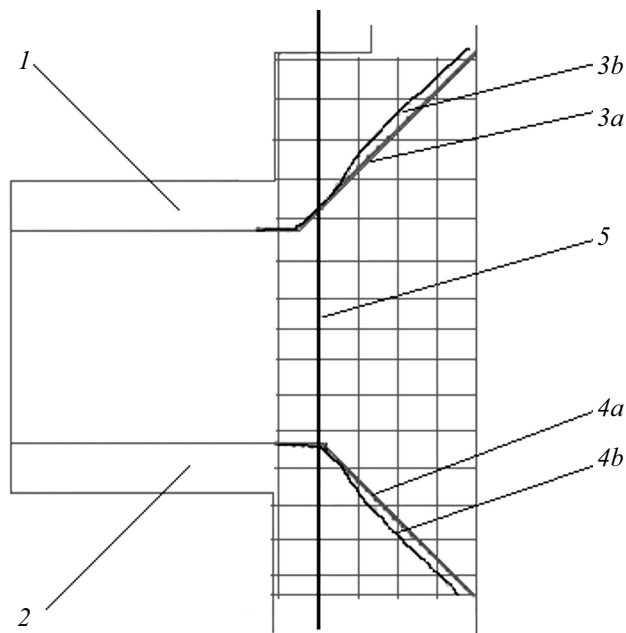


Рис. 3. Профили выходной части стенок в модели СПД-100ПМ после эрозионных испытаний в течение 50 ч. 1 — внутренняя стенка, 2 — наружная стенка, 3а, 3b — профили внутренней стенки до и после испытаний соответственно, 4а, 4b — профили наружной стенки до и после испытаний соответственно, 5 — наружная плоскость внешнего магнитного полюса.

Таким образом, можно ожидать, что путем ее увеличения удастся уложить СИУ в расширенной за пределами плоскости полюсов части ускорительного канала.

Для проверки реализуемости обсуждаемой возможности была разработана и испытана лабораторная модель двигателя типа СПД-100ПМ масштаба двигателя СПД-100 с вынесенным примерно на $0.6b_{ch}$ максимумом распределения магнитного поля относительно плоскости полюсов магнитной системы и расширенными под углом 45° стенками ускорительного канала (начиная от плоскости полюсов магнитной системы). Исследование ее характеристик при повышенном расходе ксенона показало, что она обладает тяговой эффективностью, не

уступающей тяговой эффективности двигателя СПД-100, а при работе в режиме с разрядным напряжением 300 V, при котором работает двигатель СПД-100, и расходе ксенона, вдвое превышающем расход в двигателе СПД-100, модель может длительное время работать с мощностью около 3 kW без перегрева ее элементов. При этом зоны эрозии целиком размещаются в расширенной части ускорительного канала за пределами плоскости полюсов магнитной системы (рис. 3). Таким образом, подтверждена возможность практически полного вынесения СИУ из конструкции двигателя.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках соглашения о предоставлении субсидии № 14.577.21.0213 от 29.09.2016 г. между Московским авиационным институтом и министерством (уникальный идентификатор ПНИЭР — RFMEF157716X0231).

Список литературы

- [1] *Кум В.П.* // ЖТФ. 2015. Т. 85. В. 3. С. 45–59.
- [2] *Кум В.П.* // Физика плазмы. 2017. Т. 43. № 4. С. 406–418.
- [3] *Hofer R., Kamhavi H., Herman D., Polk J., Snyder J.S., Mikellides I., Huang W., Myers J., Yim J., Williams G., Lopez Ortega A., Jorns B., Sekerak M., Griffiths C., Shastry R., Haag T., Verhey T., Gilliam B., Katz I., Goebel D., Anderson J.R., Gilland J., Clayman L.* Development approach and status of the 12.5 kW HERMeS hall thruster for the solar electric propulsion technology demonstration mission // Proc. of the 30th Int. Electric Propulsion Conf. and 6th Nano-satellite Symp. Kobe, Hyogo, Japan, 2015. P. IEPC-2015-186/ISTS-2015-b-186 (1–18).
- [4] *Solodukhin A.* Modern trends and development prospects of thrusters with closed drift of electrons // Spacecraft propulsion 2018 Conf. Sevilla, Spain, 2018. Presentation 195.
- [5] *Conversano R., Goebel D.M., Hofer R.R., Mikellides I., Wirz R.* Magnetically shielded miniature hall thruster: design improvement and performance analysis // Proc. of the 30th Int. Symp. on Space Technology and Science, 34th Int. Electric Propulsion Conf. and 6th Nano-satellite Symp. Hyogo–Kobe, Japan, 2015. Paper IEPC-2015-100/ISTS-2015-b-100 (P. 1–12).
- [6] *Mitrofanova O.A., Gnizdor R.Yu.* Influence of SPT magnetic field on life time characteristics of the thruster // 33rd Int. Electric Propulsion Conf. Washington, D.C., USA: The George Washington University, 2013. P. IEPC-2013-51 (P. 1–8).
- [7] *Гришин С.Д., Ерофеев В.С., Жаринов А.В.* // Плазменные ускорители / Под ред. Л.А. Арцимовича. М.: Машиностроение, 1973. С. 54–61.