

04.1

Динамика ионов в струе стационарного плазменного двигателя, работающего на криптоне

© Д.В. Меркурьев, С.В. Баранов, В.П. Ким, А.В. Мельников, Е.А. Шилов

Научно-исследовательский институт прикладной механики и электродинамики Московского авиационного института (Национального исследовательского университета), Москва, Россия
E-mail: riame4@mail.ru

Поступило в Редакцию 7 ноября 2022 г.

В окончательной редакции 2 декабря 2022 г.

Принято к публикации 2 декабря 2022 г.

Приведены результаты экспериментального определения пространственного распределения параметров плазмы и потоков ускоренных ионов, истекающих из модели стационарного плазменного двигателя СПД-70В новой схемы, работающей на криптоне, а также параметров плазмы и направленных потоков ионов в окрестности указанной модели двигателя, движущихся в радиальном и „обратном“ направлениях.

Ключевые слова: стационарный плазменный двигатель, ионизация рабочего вещества, ускорение ионов, перезарядка ионов на нейтральных атомах, „радиальные“ и „обратные“ потоки ионов.

DOI: 10.21883/PJTF.2023.03.54463.19416

Стационарные плазменные двигатели Морозова являются в настоящее время наиболее широко используемыми в космической технике электрическими ракетными двигателями, и их применение расширяется [1]. При этом ранее летные образцы стационарных плазменных двигателей (СПД) работали в основном на ксеноне, но в последнее время начали разрабатываться и применяться двигатели этого типа, работающие на криптоне, который существенно дешевле ксенона и производится в значительно больших масштабах. Это позволяет решить проблему обеспечения данным рабочим веществом (РВ) двигательных установок управления движением космических аппаратов (КА) в системах с большими требуемыми его количествами, таких как многотысячная орбитальная группировка Starlink [2]. В связи с отмеченным активизировались исследования и разработки новых СПД, работающих на криптоне. При этом важное значение как в научном, так и в прикладном плане имеют исследования процессов в струях таких двигателей, позволяющие изучать эффективность ионизации частиц РВ в разряде СПД и формирование потоков ускоренных ионов, а также протекание вторичных процессов в их струях [3,4]. В настоящей работе приводятся результаты исследования пространственных распределений параметров плазмы и потоков ускоренных ионов в струе работающей на криптоне экспериментальной модели СПД-70В новой схемы с наружным диаметром ускорительного канала 70 мм и вынесенной из рабочего канала зоной ускорения, в которой реализуется основное падение потенциала, а также „радиальных“ и „обратных“ ионных потоков и параметров плазмы в окрестности указанной модели СПД.

В СПД ионизация потока РВ и ускорение образовавшихся ионов осуществляются в плазме электрического разряда с преимущественно продольным электрическим

и преимущественно радиальным магнитным (скрещенными) полями. Фокусировка ускоряемых ионов в разряде СПД затруднена из-за сложности управления распределением электрического поля в указанном разряде, определяющего движение ионов, поскольку оно зависит от многих сложных и недостаточно изученных процессов. Поэтому ускоренный поток ионов, истекающий из СПД, как правило, имеет значительную расходимость. А это создает определенные проблемы, связанные с воздействием струи двигателя на элементы конструкции КА. С учетом отмеченного одной из задач настоящей работы является получение данных о пространственном распределении потока ускоренных ионов и их энергетических характеристиках в струе работающей на криптоне модели СПД-70В. Наличие этих данных позволяет осуществлять оценки воздействий струи работающего двигателя на указанные элементы конструкции КА, оценку влияния неполноты переработки потока атомов в ионы и использования приложенного напряжения разряда на ускорение ионов, а также расходимости струи и разброса ионов по скоростям [3,4]. Другой задачей является исследование направлений движения потоков ионов, возникающих вне канала у выходных торцов стенок разрядной камеры на границах основного потока и формирующих „радиальные“ потоки ионов с достаточно большими энергиями [3,4], а также „обратных“ потоков ионов. Последние возникают в струе вследствие вторичных процессов, основным из которых является перезарядка ускоренных ионов на нейтральных атомах, практически всегда присутствующих в струе из-за неполной переработки потока атомов в ионы в основном разряде, а также попадающих в струю из катода. Перезарядившиеся ионы имеют малую энергию и двигаются в плазме струи под действием электрического поля, формирующегося вследствие градиентов концентрации

плазмы. Они двигаются в основном в радиальных и „обратных“ (противоположных направлению основного ускорения) направлениях, захватывают с собой электроны и формируют плазменную „околоаппаратную“ среду, способную определять потенциалы контактирующих с ней элементов конструкции КА при работе двигателя и влиять на работу отдельных приборов.

Решение первой из названных задач осуществлялось, как и в [3], путем измерения плотности тока ускоренных ионов и их энергии электростатическим энергоанализатором, а параметры плазмы определялись с помощью цилиндрического электростатического зонда. Для этого модель СПД размещалась у оси горизонтальной вакуумной камеры с внутренним диаметром 2 м и рабочей длиной до 6 м, откачиваемой криогенными высоковакуумными и „безмасляными“ форвакуумными насосами, при этом ось модели была параллельна оси камеры. Зонды могли контролируемо перемещаться в струе работающей модели в горизонтальной плоскости, содержащей ось модели двигателя, вдоль окружности с центром в точке пересечения названной оси с плоскостью выходного сечения ее рабочего канала и радиусом 0.7 м. Для определения распределения плотности тока ускоренных ионов по углу β отклонения направлений измерения от оси модели энергоанализатор перемещался с постоянной скоростью в пределах углов отклонения β от оси двигателя от -90 до $+90^\circ$, при этом на анализирующей сетке устанавливалось положительное смещение $+30$ В относительно экранной сетки энергоанализатора и вакуумной камеры для отсечки „медленных“ ионов из плазмы. Интегрирование полученного распределения плотности тока по полусфере, в которую истекает струя, позволяло получать оценки расходимости потока ускоренных ионов и полного тока ионов, истекающих из модели [3]. Для определения параметров плазмы и функции распределения ионов по энергии зонды останавливались в разных положениях в струе с шагом 10° по углу отклонения направлений измерения от оси модели СПД. В каждом положении измерялись вольт-амперные характеристики (ВАХ) цилиндрического зонда и регистрировались „кривые задержки“ энергоанализатора путем подачи на анализирующую сетку 20 циклов пилообразного, тормозящего ионы напряжения с регистрацией тока коллектора зонда при каждом напряжении на анализирующей сетке. Дифференцируя „кривые задержки“, можно было получать функцию распределения ионов по энергии, а с ее помощью определять среднее значение энергии ионов при заданных углах отклонения направлений измерения от оси модели СПД.

Для решения второй задачи в окрестности выходного сечения рабочего канала (далее выходная плоскость) на двухкоординатном устройстве перемещения устанавливался контролируемо вращающийся вокруг вертикальной оси плоский зонд с нормалью, которая при вращении перемещалась в горизонтальной плоскости, содержащей ось двигателя. Останавливая вращение этого зонда, можно было определять его ВАХ, а также радиаль-

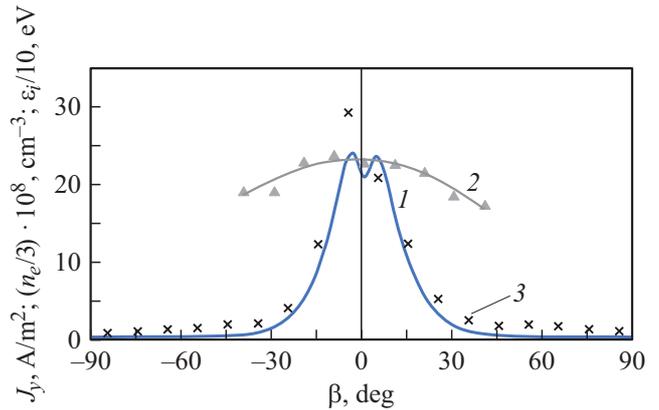


Рис. 1. Распределения плотности тока ускоренных ионов J_y (1), средней энергии ионов ϵ_i (2) и концентрации плазмы n_e (3) по углу отклонения направлений измерения от оси модели.

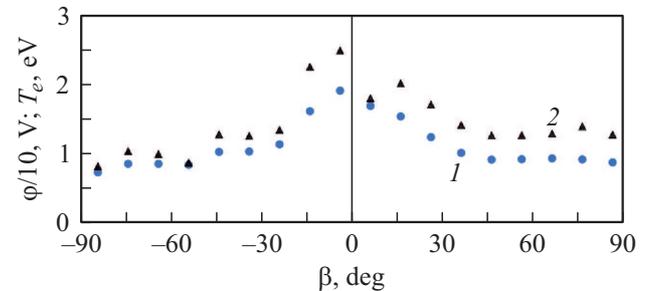


Рис. 2. Распределения потенциала плазмы ϕ (1) и температуры электронов T_e (2) по углу отклонения направлений измерения от оси модели двигателя.

ные и продольные компоненты направленного ионного тока $J_{iz} = J_{iz+} - J_{iz-}$ и $J_{ir} = J_{ir+} - J_{ir-}$, определяющие вектор направленного ионного тока $\mathbf{J}_i(J_{iz}, J_{ir})$, где J_{iz+} , J_{iz-} и J_{ir+} , J_{ir-} — значения ионного потока на зонд соответственно по направлению ускорения основного потока ($z+$) и против этого направления ($z-$), от модели двигателя ($r+$) и к этой модели ($r-$). Измерения проводились в горизонтальной плоскости, содержащей ось двигателя, в нескольких точках линий ее пересечения с тремя перпендикулярными оси двигателя плоскостями, первая из которых совпадала с выходной плоскостью двигателя, вторая была смещена на 10 см по направлению $z+$, а третья — на 10 см по направлению $z-$. В каждой точке измерений определялись ВАХ зонда, позволяющие получать оценки параметров плазмы и ионные токи на зонд при указанных ранее четырех ориентациях приемной поверхности зонда.

Все измерения, результаты которых представлены в настоящей публикации, проведены при работе модели СПД-70В на криптоне в режиме с разрядным напряжением 300 В и разрядным током 4.5 А. При этом тяговая эффективность (отношение кинетической мощности потока, истекающего из модели, рассчитанной

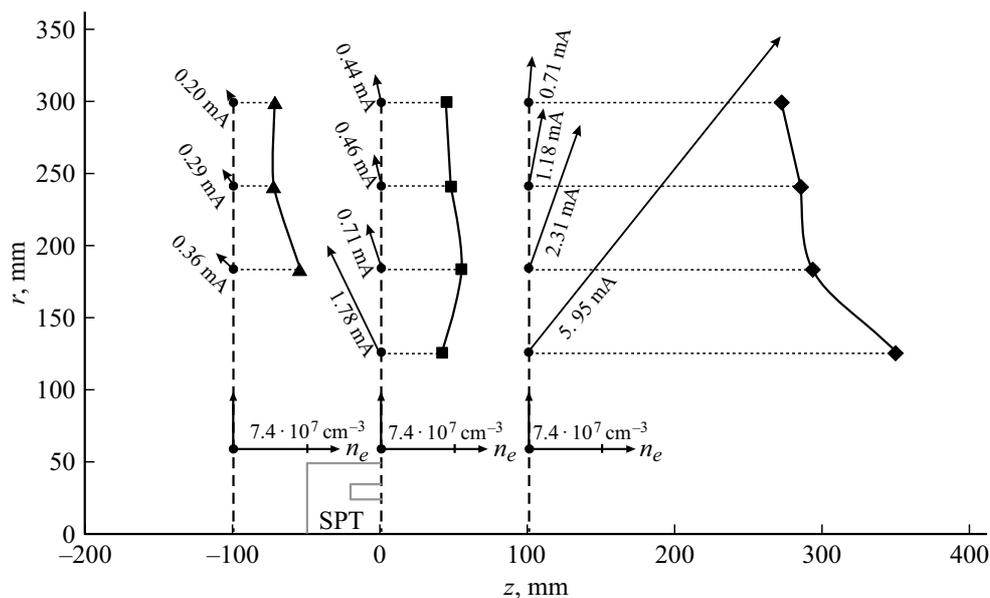


Рис. 3. Поля направленных ионных токов (показаны стрелками) и концентрации плазмы (показаны точками) в окрестности работающей на криптоне модели СПД-70В.

по измеренной реактивной тяге модели и массовому расходу криптона через модель, к мощности разряда) составляла $40 \pm 3\%$. Потенциал корпуса модели относительно вакуумной камеры в данных экспериментах не измерялся, но в стационарных режимах работы СПД на криптоне он обычно отклонялся от потенциала катода, составлявшего $-(15-20)$ В, не более чем на ± 10 В. Таким образом, его значения могли быть в диапазоне от -5 до -30 В, что по оценкам авторов не должно было влиять на результаты измерений ввиду достаточно высокой концентрации плазмы и малой величины дебаевского радиуса и глубины проникновения влияния потенциала отрицательно заряженной поверхности в объем плазмы, а также малых размеров внешней поверхности корпуса модели по сравнению с размерами плазменного образования.

Наиболее интересные из полученных результатов приведены на рис. 1–3. Они свидетельствуют о том, что распределения параметров плазмы и плотности тока ускоренных ионов в струе модели СПД-70В аналогичны полученным для двигателей, работающих на ксеноне (рис. 1, 2). Однако полуугол расходимости струи составил около 58° , что заметно больше, чем для струи серийного двигателя типа СПД-100 на ксеноне (около 45°) [3]. Отношение рассчитанного по полученным данным полного тока ионов, истекающих из двигателя, к „расходному“ току, рассчитанному по потоку атомов криптона через рабочий канал модели в предположении его полной переработки в однократно заряженные ионы, составило около 0.7. Это значение ниже, чем для двигателя СПД-100 [3]. Значения средней энергии ускоренных ионов составили 200–240 эВ в пределах

углов отклонения направлений измерения от оси до 40° (рис. 1), что близко к полученным для СПД-100 [3].

Отмеченные различия в данных для модели СПД-70В и двигателя СПД-100 можно объяснить разницей в схемах и размерах двигателей и различиями атомных масс и ионизационных характеристик криптона и ксенона. В свою очередь они объясняют пониженную тяговую эффективность работающей на криптоне модели СПД-70В.

Сопоставление распределений плотности тока ускоренных ионов и концентрации плазмы (рис. 1) свидетельствует о том, что при углах отклонения направлений измерения от оси до примерно 20° они близки по характеру, т. е. при этих углах концентрация плазмы в струе определяется в основном ускоренными ионами.

Результаты определения направленных ионных токов в окрестности модели СПД-70В (рис. 3) отчетливо демонстрируют довольно значительные „радиальные“ и „обратные“ потоки ионов. Как уже отмечалось ранее, наиболее вероятным источником „обратных“ потоков ионов является перезарядка ускоренных ионов на нейтральных атомах [4].

В целом, в результате выполненной работы получены новые данные о характеристиках струи новой модели СПД-70В, работающей на криптоне, включая впервые полученные поля „радиальных“ и „обратных“ направленных ионных токов, которые будут полезны при дальнейшем анализе физических особенностей работы СПД.

Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (грант № 075-15-2021-301 от 19.04.2021 г.).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] D. Lev, R.M. Myers, K.M. Lemmeretal, in *Proc. 35th Int. Electric Propulsion Conf.* (Georgia Institute of Technology, Atlanta, USA, 2017), paper IEPC 2017-242.
- [2] *Space X reveals more Starlink info after launch of first 60 satellites* [Электронный ресурс]. <https://techcrunch.com/2019/05/24/spacex-reveals-more-starlink-info-after-launch-of-first-60-satellites>
- [3] А.С. Архипов, В. Ким, Е.К. Сидоренко, *ЖТФ*, **82** (5), 42 (2012). [A.S. Arkhipov, V. Kim, E.K. Sidorenko, *Tech. Phys.*, **57** (5), 621 (2012). DOI: 10.1134/S1063784212050040].
- [4] В.П. Ким, А.С. Архипов, А.М. Бишаев, Д.В. Меркурьев, Е.К. Сидоренко, *Физика плазмы*, **40** (10), 937 (2014). DOI: 10.7868/S0367292114090030 [V.P. Kim, A.S. Arkhipov, A.M. Bishayev, D.V. Merkur'ev, E.K. Sidorenko, *Plasma Phys. Rep.*, **40** (10), 828 (2014). DOI: 10.1134/S1063780X14090037].