

04.1

## Особенности ионизации потока рабочего вещества в стационарных плазменных двигателях с вынесенной зоной ускорения, работающих на криптоне

© Д.В. Меркурьев<sup>1</sup>, В.Г. Калязин<sup>1</sup>, В.П. Ким<sup>1</sup>, А.Н. Нестеренко<sup>2</sup>, С.Ю. Приданников<sup>2</sup>, Е.А. Шилов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Научно-исследовательский институт прикладной механики и электродинамики Московского авиационного института (Национального исследовательского университета), Москва, Россия

<sup>2</sup> АО „Опытное конструкторское бюро „Факел“, Калининград, Россия  
E-mail: riame4@mail.ru

Поступило в Редакцию 22 июня 2022 г.

В окончательной редакции 19 июля 2022 г.

Принято к публикации 19 июля 2022 г.

Приводятся результаты исследования особенностей ионизации потока атомов криптона в газовом разряде в скрещенных электрическом и магнитном полях, горящем в стационарных плазменных двигателях с вынесенным из конструкции двигателя слоем ионизации и ускорения. Определены интегральные характеристики и зависимости тока ионов, истекающих из двигателей при разных режимах их работы на криптоне. Показано, что характер зависимости отношения упомянутого тока ионов к разрядному току от разрядного напряжения в этих двигателях заметно отличается от получаемого в двигателях традиционной схемы уменьшением величины и доли ионного тока в разрядном токе при увеличении данного напряжения. Это приводит к заметному изменению зависимости тяговой эффективности от названного напряжения.

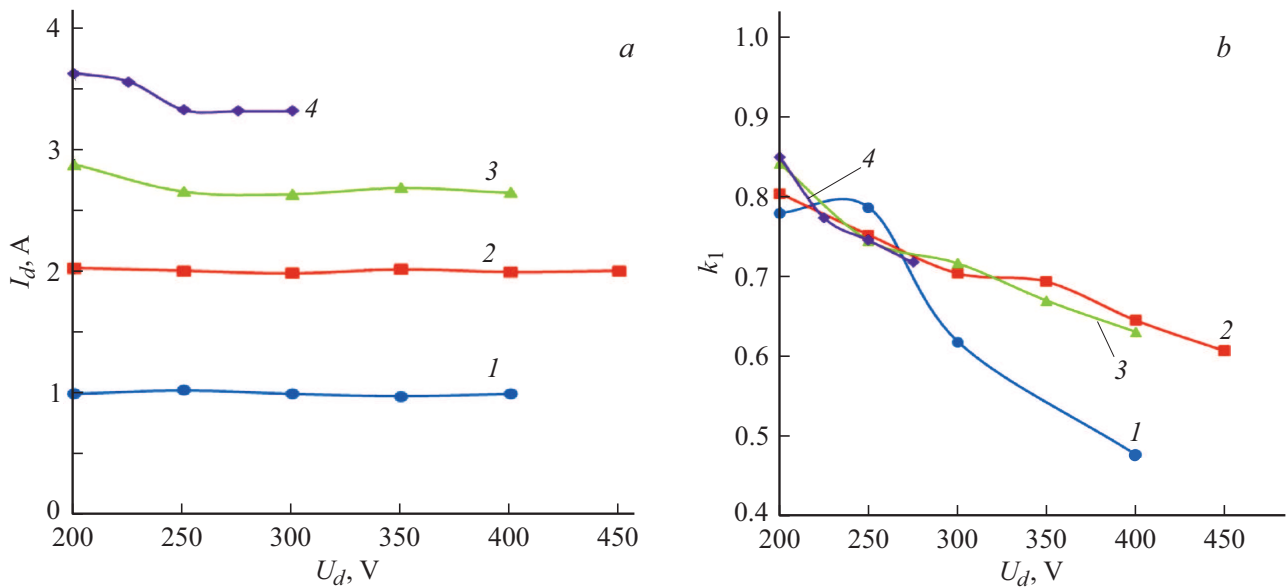
**Ключевые слова:** стационарный плазменный двигатель, ионизация рабочего вещества, разряд в скрещенных электрическом и магнитном полях.

DOI: 10.21883/PJTF.2022.17.53286.19287

Стационарные плазменные двигатели (СПД) Морозова в настоящее время являются наиболее широко используемыми в космической технике электрическими ракетными двигателями, и их применение расширяется [1,2]. При этом начали активно разрабатываться и применяться СПД, работающие на альтернативных использовавшемуся ранее ксенону рабочих веществах (РВ) [2–6]. Среди них активно осваивается криптон, который существенно дешевле ксенона и производится в значительно больших масштабах. Это позволяет решить проблему обеспечения РВ двигательных установок космических аппаратов (КА) в системах с большими требуемыми его количествами, таких, например, как многотысячная орбитальная группировка Starlink [6]. Но при разработке СПД на криптоне сложно обеспечить высокую тяговую эффективность и ресурс двигателя. Дело в том, что для обеспечения высокой эффективности ионизации потока криптона в электрическом разряде двигателя необходимо работать в режимах с повышенными плотностями расхода криптона в слое ионизации и ускорения (СИУ) и мощностями разряда [3,7]. В результате проблемным становится обеспечение большого ресурса двигателя. С учетом изложенного наиболее перспективным направлением разработки СПД на криптоне является переход к схеме двигателя (далее СПД-В) с вынесенным из его конструкции СИУ, в котором реализуется основное падение потенциала. Такой переход позволяет снизить потери ускоренных ионов на стенках

разрядной камеры и увеличить ресурс СПД в режимах работы с повышенными плотностями расхода РВ в СИУ в рабочем канале двигателя. Известные работы, в том числе проведенные авторами, свидетельствуют о возможности создания конкурентоспособных двигателей такой схемы [3,8]. Однако при таком переходе несколько изменяются условия для ионизации атомов в СИУ из-за более резкого, чем в двигателях традиционной схемы, расширения потока атомов и ионов и снижения концентрации плазмы в СИУ. С учетом изложенного задача данного исследования состоит в выявлении особенностей ионизации потока криптона в двигателях типа СПД-В.

Для решения указанной задачи было проведено исследование зависимости тока  $I_i$  ускоренных ионов, истекающих из моделей двигателей СПД-50В, СПД-70В и СПД-140В типа СПД-В с наружными диаметрами выходной части ускорительного канала 50, 70 и 140 мм, от режимов их работы. Определение  $I_i$  может быть осуществлено путем измерения пространственного распределения плотности тока ускоренных ионов, истекающих из двигателя, и интегрирования этого распределения по поверхности, перекрывающей выходную полусферу, в которую истекает струя двигателя (первый метод) [9]. Можно также получать оценку  $I_i$  вторым методом, измеряя ток в цепи мишени-приемника ионов при ее соединении с эмиттером катода двигателя. При этом изменение потенциала разрядной цепи двигателя при



**Рис. 1.** Вольт-амперная характеристика (а) и зависимость отношения ионного тока к разрядному  $k_1 = I_i/I_d$  от разрядного напряжения  $U_d$  (б) для модели СПД-50В.  $\dot{m}_a = 1.07$  (1), 1.80 (2), 2.34 (3) и 2.81 mg/s (4).

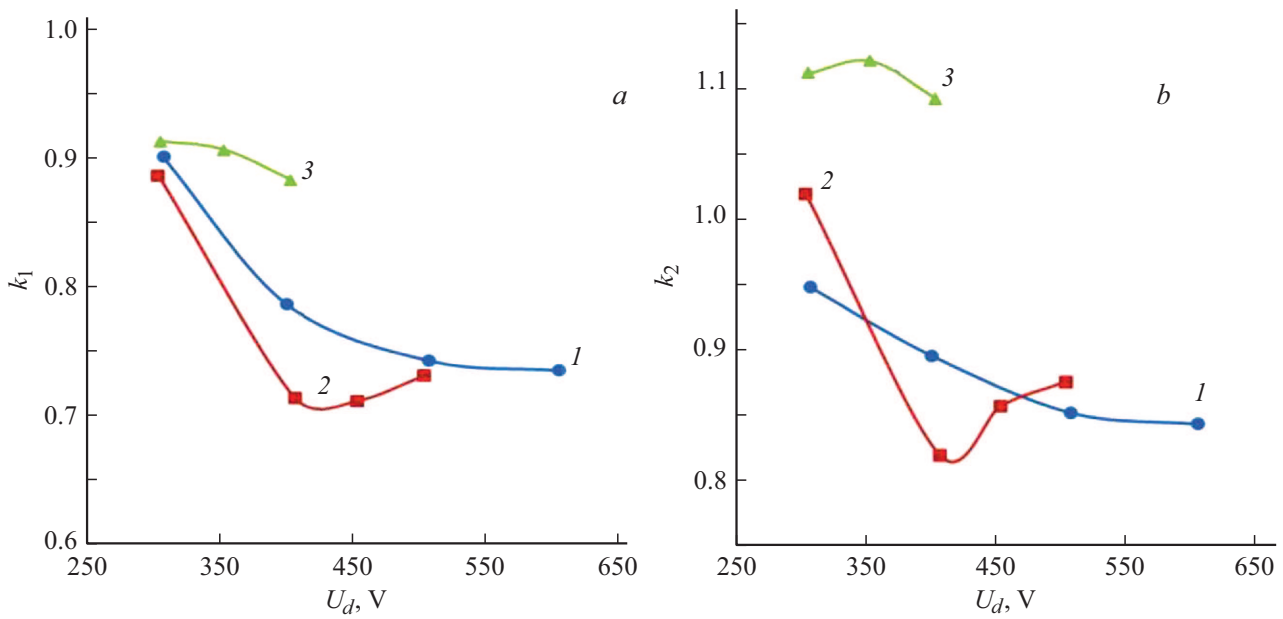
уходе из нее ионов, попадающих на приемник, поддерживается сбросом электронов из этой цепи на приемник с эмиттера катода (отрицательного вывода источника питания разряда) по проводнику, соединяющему эмиттер катода и приемник ионов. При этом возможен сброс электронов с эмиттера катода и через плазму разряда в нем и плазму струи, но сопротивление для электронов по этому пути значительно больше, и по оценкам соответствующий ток должен быть существенно меньше тока по проводнику между эмиттером катода и камерой. Это подтверждается тем, что измерения, проведенные обоими методами, дают близкие результаты. С учетом изложенного в данном исследовании измерения  $I_i$  были проведены более простым (вторым) методом. Эти измерения были выполнены для моделей СПД-50В и СПД-70В в вакуумной камере с диаметром 1.5 м и рабочим объемом около 12 м<sup>3</sup>, а для модели СПД-140В — в камере с диаметром 2 м и рабочим объемом около 18 м<sup>3</sup>, высоковакуумная откачка осуществлялась криогенными насосами. При этом давление в камерах при работе моделей не превышало  $7 \cdot 10^{-5}$  мм Нг.

На рис. 1 представлены результаты определения вольт-амперных характеристик и зависимостей от разрядного напряжения  $U_d$  отношения  $k_1 = I_i/I_d$  тока  $I_i$  ионов, истекающих из модели двигателя СПД-50В, к разрядному току  $I_d$ , получавшемуся оптимизацией токов в катушках намагничивания по минимуму разрядного тока, оптимального для СПД.

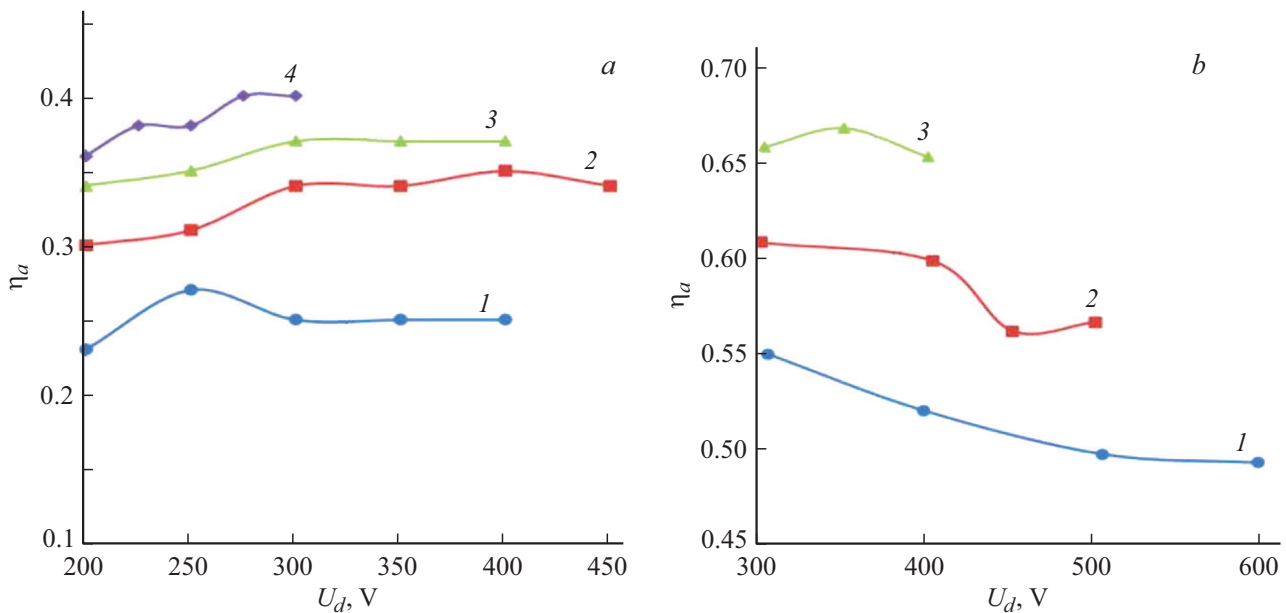
Как видно, наблюдается отчетливая тенденция уменьшения этого отношения с увеличением разрядного напряжения  $U_d$ . Эта тенденция отличается от соответствующей тенденции для двигателей традиционной схемы при их работе на ксеноне, при которой начиная с

определенного значения разрядного напряжения значения  $k_1$  выходят на уровень  $\sim 0.8$  и при дальнейшем увеличении напряжения  $U_d$  изменяются незначительно [9]. Для моделей СПД-70В и СПД-140В большего размера такое уменьшение  $k_1$  проявляется слабее, но тенденция уменьшения сохраняется (рис. 2). Отмеченная тенденция является важной особенностью работы СПД-В и отражает возрастание электронной составляющей в разрядном токе при оптимизированных режимах работы и соответствующих потерь. Она объясняет более слабый рост тягового коэффициента полезного действия (КПД) двигателей типа СПД-В с увеличением разрядного напряжения (рис. 3), чем в случае двигателей традиционной схемы. Названный КПД  $\eta_a$  определялся с использованием измеренных значений реактивной тяги  $F$  двигателей, массового расхода криптона  $\dot{m}_a$  через их ускорительный канал и мощности разряда  $N_d = U_d I_d$  исходя из соотношения  $\eta_a = \dot{m}_a \langle V_z \rangle^2 / 2N_d = F^2 / 2\dot{m}_a N_d$ , где  $\langle V_z \rangle = F / \dot{m}_a$  — продольная составляющая средне-массовой скорости истечения потока атомов и ионов криптона из двигателя. Полученные данные показали также, что отношение  $k_2 = I_i/I_m$  ионного тока к „расходному“ току  $I_m = \dot{m}_a e / M$ , где  $e$  и  $M$  — соответственно заряд электрона и масса атома (иона) криптона, при повышенных напряжениях больше единицы (рис. 2). Это свидетельствует о наличии в струе, истекающей из двигателя, многозарядных ионов. Аналогичный результат получался и при работе СПД традиционной схемы на ксеноне [9].

На результаты измерений ионного тока влияет и вторичная эмиссия электронов. Однако измерения зондами с сетками перед коллектором с отрицательным смещением потенциала относительно него показывают,



**Рис. 2.** Зависимости отношений  $k_1 = I_i/I_d$  (a) и  $k_2 = I_i/I_m$  (b) для модели СПД-140В от режима ее работы.  $\dot{m}_a = 10$  (1), 14 (2) и 18 mg/s (3).



**Рис. 3.** Зависимости тягового КПД от режимов работы двигателей моделей СПД-50В (a) и СПД-140В (b).  $\dot{m}_a$ , mg/s: a) 1 — 1.07, 2 — 1.80, 3 — 2.34, 4 — 2.81; б) 1 — 10, 2 — 14, 3 — 18.

что при типичных энергиях ионов и чистой поверхности коллектора из нержавеющей стали вторичная эмиссия электронов не превышает 3–5%.

Уменьшение отношения тока ионов, истекающих из двигателя, к разрядному току с увеличением разрядного напряжения свидетельствует об увеличении электронной составляющей  $I_e$  разрядного тока и соответствующих потерь энергии. Это увеличение приводит к более слабому по сравнению с двигателями традиционной схемы возрастанию тяговой эффективности, а затем и

к стабилизации или снижению тяговой эффективности с увеличением разрядного напряжения при меньших его значениях, чем у двигателей традиционной схемы (рис. 3).

Увеличение электронной составляющей  $I_e$  разрядного тока может быть обусловлено сужением СИУ в двигателях типа СПД-В и повышением среднеквадратичной амплитуды колебаний разрядного тока при увеличении разрядного напряжения, физические причины которых необходимо изучить в дальнейшем.

Таким образом, основной особенностью процессов ионизации в разряде СПД с вынесенным из конструкции двигателя слоем ионизации и ускорения, требующей дальнейших исследований, является уменьшение суммарного ионного тока, истекающего из двигателя, и отношения этого тока к разрядному току, свидетельствующее об увеличении доли электронного тока в разрядном токе в режимах работы с минимальным разрядным током, оптимальных для СПД.

### Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ по гранту № 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. Lemmer, J. Kolbeck, M. Keidar, H. Koizumi, H. Liang, D. Yu, T. Schönherr, J. Gonzalez Del Amo, W. Choe, R. Albertoni, A. Hoskins, S. Yan, W. Hart, R. Hofer, I. Funaki, A. Lovtsov, K. Polzin, A. Olshanskii, O. Duchemin, in *Proc. 35th Int. Electric Propulsion Conf.* (Georgia Institute of Technology, Atlanta, USA, 2017), paper IEPC-2017-242.
- [2] P. Hruby, N. Demmons, D. Courtney, M. Tsay, J. Szabo, V. Hruby, in *Proc. 36th Int. Electric Propulsion Conf.* (University of Vienna, Austria, 2019), paper IEPC-2019-926.
- [3] В.П. Ким, В.С. Захарченко, Д.В. Меркурьев, П.Г. Смирнов, Е.А. Шилов, *Физика плазмы*, **45** (1), 14 (2019). DOI: 10.1134/S0367292119010086 [V.P. Kim, V.S. Zakharchenko, D.V. Merkur'ev, P.G. Smirnov, E.A. Shilov, *Plasma Phys. Rep.*, **45** (1), 11 (2019). DOI: 10.1134/S1063780X19010082].
- [4] C. Ducci, T. Andreussi, A. Arkhipov, A. Passaro, M. Andrenucci, A. Bulit, C. Edwards, in *Proc. 34th Int. Electric Propulsion Conf.* (Kobe, Hyogo, Japan, 2015), paper IEPC-2015-126.
- [5] J. Kurzyna, M. Jakubczak, A. Szelecka, A. Riazantsev, in *Proc. 36th Int. Electric Propulsion Conf.* (University of Vienna, Austria, 2019), paper IEPC-2019-591.
- [6] *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>
- [7] А.И. Морозов, И.В. Меликов, *ЖТФ*, **44** (3), 544 (1974).
- [8] В.П. Ким, Р.Ю. Гниздор, Д.П. Грдличко, В.С. Захарченко, Д.В. Меркурьев, О.А. Митрофанова, П.Г. Смирнов, Е.А. Шилов, *Письма в ЖТФ*, **44** (23), 129 (2018). DOI: 10.21883/PJTF.2018.23.47020.17408 [V.P. Kim, R.Yu. Gnizdor, D.P. Grdlichko, V.S. Zakharchenko, D.V. Merkur'ev, O.A. Mitrofanova, P.G. Smirnov, E.A. Shilov, *Tech. Phys. Lett.*, **44** (12), 1108 (2018). DOI: 10.1134/S1063785018120271].
- [9] 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].