

Влияние траекторий первичных электронов на эффективность работы газоразрядной камеры ионного двигателя

Д. А. Кравченко, А. С. Ловцов

В данной работе приводятся результаты моделирования плазмы в газоразрядной камере ионного двигателя ИД-50. Для получения этих данных использовалась двухмерная кинетическая модель, основанная на методе «частиц в ячейках» (Particle-in-Cell). Анализ результатов, которые лежат в хорошем соответствии с экспериментальными данными, позволил выявить корреляцию между траекториями первичных электронов и эффективностью работы газоразрядной камеры. Показана взаимосвязь между геометрией магнитной системы, определяющей траектории первичных электронов, картиной течения ионной компоненты и величиной энергетической цены иона.

Ключевые слова: электроракетные двигатели, ионные двигатели, плазма, численное моделирование, кинетическое моделирование, частица в ячейке, первичные электроны.

Ссылка: Кравченко Д. А., Ловцов А. С. // Прикладная физика. 2019. № 1. С. 35.

Reference: D. A. Kravchenko and A. S. Lovtsov, Prikl. Fiz., No. 1, 35 (2019).

Введение

В настоящее время в Центре Келдыша ведется активная работа по тематике ионных двигателей (ИД). Разрабатываются и проходят испытания двигатели различной мощности, предназначенные для решения широкого спектра задач [1, 2]. Вместе с тем ведется работа по созданию математических моделей как для исследования физики процессов, протекающих в плазме ионных двигателей, так и для решения инженерных задач предварительной апробации перспективных конструктивных решений и усовершенствования конструкции.

Цель данного исследования заключалась в выявлении физического механизма, ответственного за влияние распределения магнитного поля в газоразрядной камере (ГРК) ионного двигателя на эффективность его работы. Для достижения этой цели применялось численное моделирование, результаты которого верифицировались на экспериментальных данных.

Используемая в этой работе модель в существенной степени вобрала в себя опыт схожих работ [3–6]. Однако определенная специфика исследуемой системы потребовала разработки особых методов моделирования. Более детальное описание структуры модели приводится в [7]. В данной статье кратко изложены ее основные особенности. Наибольшее внимание уделено обсуждению особенностей разряда, выявленных при помощи моделирования.

Модель

Используемая в данной работе модель была построена по классической схеме для моделей, основанных на методе «частиц в ячейках», и является двухмерной по координате с трехмерным пространством скоростей (2D3V-FullPIC). Плазма рассматривалась как смесь трех компонент: нейтралов, ионов и электронов. Движение макрочастиц моделировалось с учетом самосогласованного электрического и стационарного магнитного поля. С помощью методики Монте-Карло моделировались наиболее значимые реакции между частицами, а именно: упругие столкновения электрон-нейтрал, неупругие столкновения электрон-нейтрал, ионизационные столкновения электрон-нейтрал, кулоновские столкновения электронов и столкновения перезарядки ионов с нейтралими. Бомовская диффузия моделировалась с помощью

Кравченко Дмитрий Александрович, н.с., к.ф.-м.н.

Ловцов Александр Сергеевич, нач. отдела, к.ф.-м.н.

ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша».

Россия, 125438, ул. Онежская, 8.

E-mail: dmitry1204@gmail.com

Статья поступила в редакцию 1 ноября 2018 г.

© Кравченко Д. А., Ловцов А. С., 2019

дополнительных упругих столкновений [8] с частотой, зависящей от величины магнитного поля B :

$$v_B = \frac{1}{16} \frac{eB}{m_e}.$$

Для обеспечения устойчивости численного решения и разрешения пространственных и временных масштабов применялся классический прием, основанный на добавлении безразмерного коэффициента τ^2 в уравнение Пуассона:

$$\nabla^2 \varphi = -\frac{e}{\tau^2 \varepsilon_0} (n_i - n_e).$$

Здесь φ – электрический потенциал, n_i и n_e – концентрации ионов и электронов соответственно.

Существует ряд отличий данной модели от ближайших аналогов [3–6]. Во-первых, модель не требует задания каких-либо известных из эксперимента или предполагаемых локальных параметров плазмы. Входными данными является простой набор параметров режима работы двигателя: геометрия камеры, топология магнитного поля, величины расхода газа в катод и газораспределитель, ток разряда, коэффициенты проницаемости ионной оптики для ионов и нейтралов.

Во-вторых, пристеночные слои плазмы не выносятся за область моделирования, а моделируются напрямую благодаря аккуратному подбору коэффициента τ . Хотя их толщина многократно увеличивается по сравнению с реальностью, тем не менее, это несущественно искажает физическую картину до тех пор, пока толщина слоев остается малой по сравнению с характерными размерами системы.

Третьей особенностью является методика моделирования катода как источника первичных электронов. Вместо задания некоторого стационарного потока частиц используется прием, основанный на искусственном поддержании квазинейтральности вблизи катодной границы с помощью добавления новых частиц. Таким образом, разряд получает столько новых электронов, сколько способен «вытянуть» из катодной плазмы, что является хорошим приближением к реальной физической картине.

Четвертое отличие заключается в учете поведения источника питания разряда, работающего в режиме стабилизации по току. Напряжение разряда (т. е. потенциал анодной границы) автоматически регулируется так, чтобы удерживать фактический ток разряда на заданном уровне.

Все перечисленные особенности модели позволили смоделировать разряд в газоразрядной

камере ионного двигателя как гибкую самосогласованную систему, в которой влияние жестких и «нефизических» ограничений сведено к минимуму.

Результаты моделирования

Модель была применена для моделирования разряда в ГРК ИД-50 – лабораторной модели ионного двигателя, которая имеет небольшой размер и для которой существует значительный объем экспериментальных данных [9]. Было смоделировано пять режимов работы газоразрядной камеры [10]. Эти режимы отличались между собой как изменением напряженности магнитного поля при сохранении геометрии магнитной системы и топологии поля (режимы I, II, III), так и вариацией геометрии при постоянной величине тока в магнитных катушках (режимы II, IV, V). Вариация геометрии магнитной системы осуществлялась за счет изменения длины и формы катодного полюсного наконечника (КПН). Параметры работы двигателя и результаты моделирования представлены в табл. 1. Полученные результаты моделирования хорошо соотносятся с экспериментом.

Анализ результатов моделирования плазмы в ГРК ИД позволил выявить определенные особенности в структуре разряда и связать их с динамикой электронов. На рис. 1 представлено распределение энергии электронов в ГРК ИД-50, полученное в ходе моделирования номинального режима работы (режим II). Это распределение является типичным для всех конфигураций данного двигателя.

В данном распределении особый интерес вызывает локальный максимум в центральной части камеры. Как видно из рисунка, на котором представлено распределение электрического потенциала, в данном месте локальный максимум потенциала электрического поля отсутствует. Таким образом, наличие высокоэнергетичного пятна, не коррелирующего с топологией электрического поля, требует анализа.

Причина упомянутого явления связана с особенностями движения первичных электродов, эмитированных катодом, на начальном участке их траекторий внутри ГРК. На рис. 2 представлен вид траекторий пучка таких электронов, полученный при учете только магнитного поля. Из рисунка видно, что магнитное поле осуществляет фокусировку пучка первичных электронов. Поскольку эти частицы обладают относительно высокой энергией (все они ускорились в катодном слое), то в точке фокуса траекторий возрастёт и средняя энергия электронов.

Таблица 1

Сравнение результатов моделирования и эксперимента

Номер режима	I	II	III	IV	V	
Длина КПН, мм	18	18	18	22	26	
Диаметр КПН, мм	24	24	24	30	24	
Эксперимент	Ток в катушках, А	3,0	4,0	5,0	4,0	4,0
	Расход ксенона, мА	90	90	90	90	90
	Напряжение разряда, В	39,3	39,7	40,8	41,8	40,5
	Ток разряда, А	0,80	0,72	0,62	0,82	0,98
	Ток пучка, мА	75,0	75,0	75,0	75,0	75,0
	Цена иона, Вт/А	419	381	337	457	529
	Газовая эффективность	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83
Расчет	Напряжение разряда, В	41,1	42,3	45,0	49,1	48,2
	Ток разряда, А	0,80	0,72	0,62	0,82	0,98
	Ток пучка, мА	72,0	73,6	76,8	74,9	69,1
	Цена иона, Вт/А	457	414	363	538	683
	Газовая эффективность	0,80	0,82	0,85	0,83	0,77

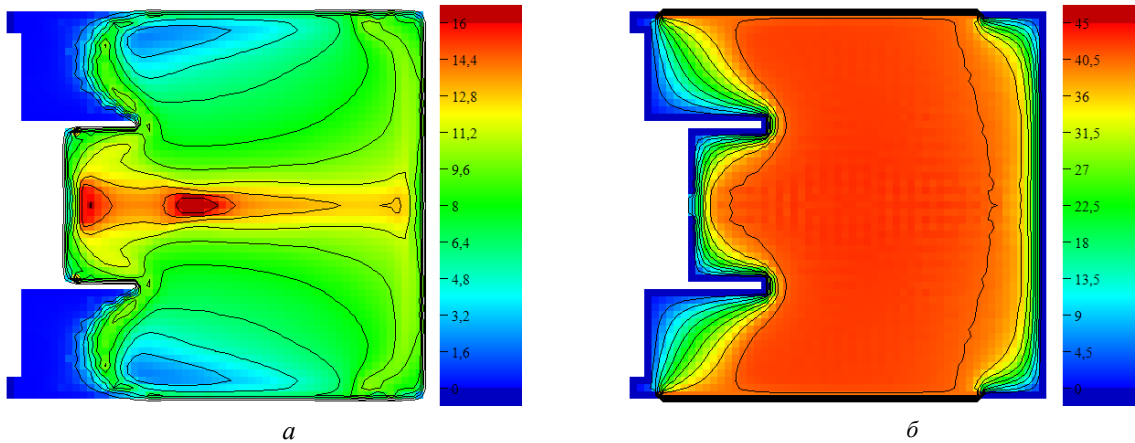


Рис. 1. Распределение параметров в области моделирования: а – энергия электронов (эВ); б – потенциал плазмы (В).

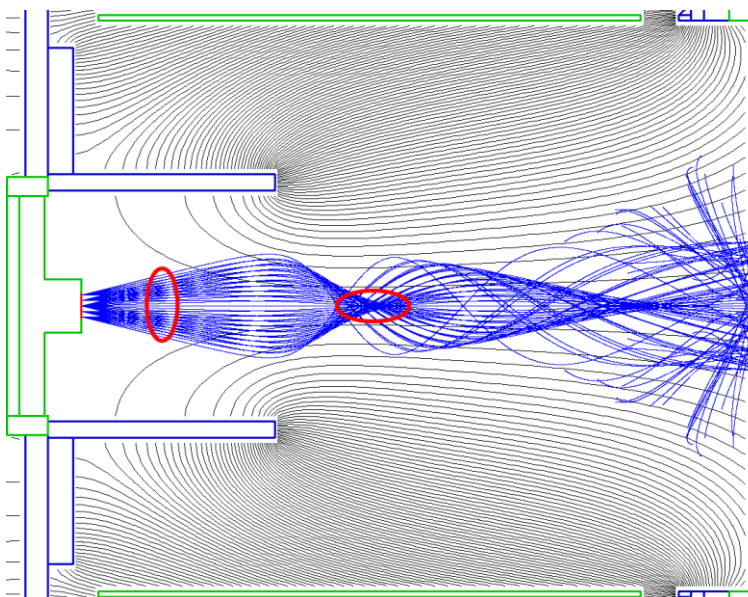


Рис. 2. Траектории первичных электронов.

Выявленная особенность является хорошим примером явлений, которые могут быть воспроизведены в моделировании только с использованием кинетических методов. Без тщательного разрешения траекторий частиц (например, в гидродинамической модели) смоделировать подобные процессы невозможно.

Анализ результатов моделирования показал, что существует корреляция между видом начальных участков траекторий первичных электронов и эффективностью работы газоразрядной камеры двигателя. Моделирование указанных выше пяти режимов работы ГРК, отличающихся величиной магнитного поля и его топологией, показало наличие связи между положением точки фокуса траекторий первичных электронов и величиной цены иона. Дальнейший анализ позволяет полагать, что

эта связь основана на структуре потенциала электрического поля и соответственно траекториях ионов внутри ГРК.

Для каждого из смоделированных режимов была выделена зона эффективного ионообразования – область, в которой все образованные ионы попадают в ионнооптическую систему. Вид этих зон показан на рис. 3.

Очевидно, что при прочих равных условиях увеличение размера этой зоны положительно влияет на эффективность работы двигателя. На рис. 4 собраны вместе вид траекторий первичных электронов и положение зоны эффективного ионообразования вблизи оси симметрии. Также на этом рисунке для каждого из режимов приведено значение энергетической цены иона.

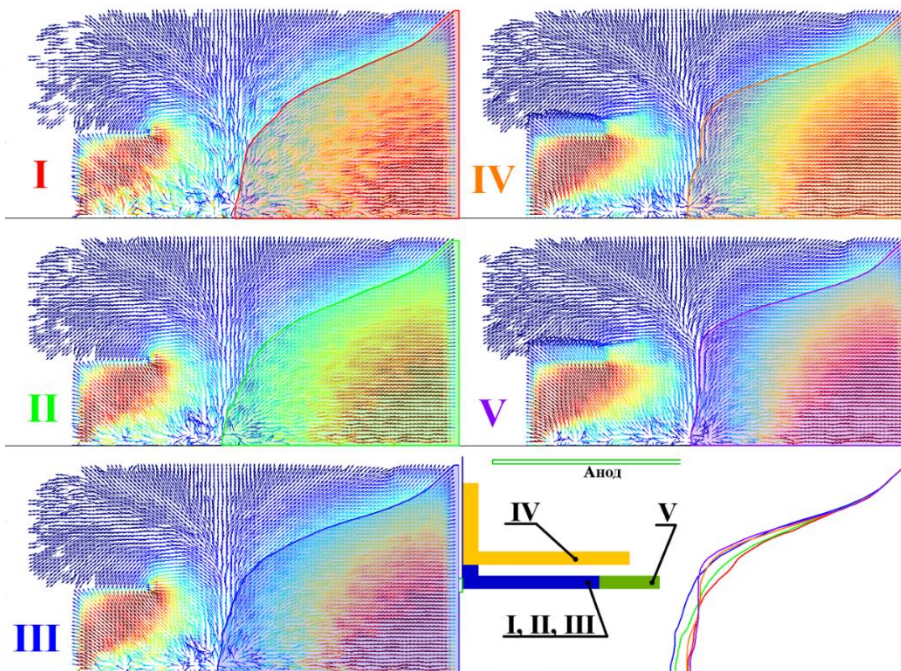


Рис. 3. Картина течения ионной компоненты и зоны эффективного ионообразования.

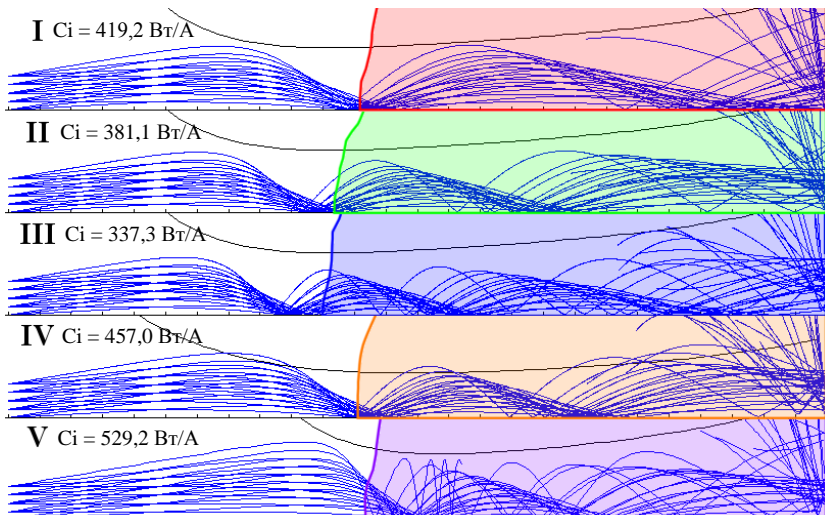


Рис. 4. Траектории первичных электронов и зоны эффективного ионообразования.

Можно ввести понятие удельной длины зоны эффективной ионизации как отношение расстояния от начала зоны до ИОС вдоль оси симметрии к полной длине газоразрядной камеры. На рис. 5 приведены зависимости этой величины от энергетической цены иона, что наглядно демонстрирует выявленную корреляцию.

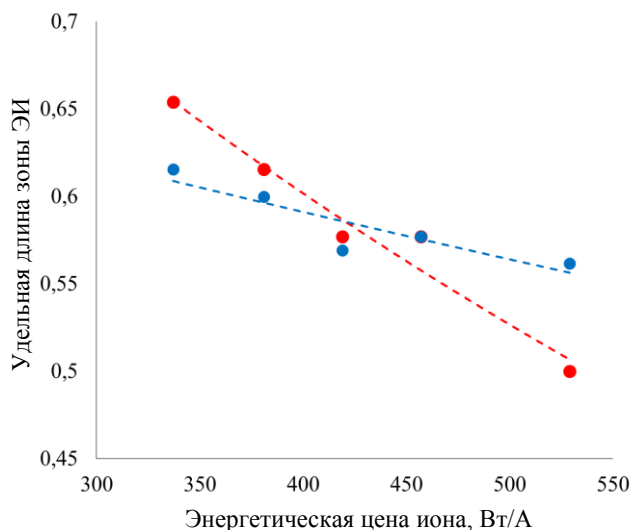


Рис. 5. Зависимость удельной длины зоны эффективного ионообразования от энергетической цены иона. ● – по положению фокуса; ● – по траекториям ионов.

Физический механизм данного явления можно объяснить следующим образом. Точка магнитной фокусировки первичных электронов является локальным максимумом энергии электронной компоненты. Как следствие, активная ионизация в этой области ведет к росту концентрации плазмы и влияет на положение точки максимума потенциала электрического поля. В свою очередь, распределение потенциала электрического поля определяет динамику ионной компоненты и, следовательно, размер и положение зоны эффективного ионообразования, что прямо влияет на эффективность работы газоразрядной камеры.

Разумеется, параметры эффективности работы двигателя, и в том числе цена иона, зависят от большого числа факторов и механизмов. Поэтому выделить четкую количественную взаимосвязь в данном случае затруднительно. Однако выявлен-

ный механизм может быть полезен при проектировании эффективных газоразрядных камер и подобных устройств. Выбрав конфигурацию магнитной системы таким образом, чтобы сфокусировать первичный высокоэнергичный пучок электронов ближе к задней стенке камеры, можно добиться увеличения эффективности работы и, в частности, снижения цены иона.

Заключение

С помощью анализа результатов численного моделирования была показана связь между траекториями первичных электронов, определяемых топологией магнитного поля, и эффективностью работы газоразрядной камеры. Полученный результат может быть полезен при проектировании газоразрядных камер ионных двигателей и подобных плазменных устройств. Стоит отметить, что выявление этого механизма было возможно только с помощью кинетической модели, точно разрешающей траектории отдельных частиц.

ЛИТЕРАТУРА

1. Горшков О. А., Муравлев В. А., Шагайда А. А. Холловские и ионные двигатели для космических аппаратов. – Машиностроение, Москва, 2008.
2. Koroteev A. S., Lovtsov A. S., Muravlev V. A., Selivanov M. Y., Shagayda A. A. // The European Physical Journal D. 2017. DOI: 10.1140/epjd/e2017-70644-6
3. Mahalingam S., Menart J. A. / 47th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. – San Diego, California, 2011. P. 1–24. – AIAA 2011-6071.
4. Wirz R., Katz I. / 40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. — Fort Lauderdale, Florida, 2004. – AIAA 2004-4107.
5. Hirakawa M., Arakawa Y. / 23rd International Electric Propulsion Conference. – Seattle, WA, 1993. – IEPC-93-242.
6. Szabo J. J. Fully Kinetic Numerical Modeling of a Plasma Thruster (PhD thesis). – Massachusetts Institute of Technology, 2001.
7. Кравченко Д. А. // Прикладная физика. 2015. № 5. С. 26.
8. Goebel D. M., Katz I. Fundamentals of Electric Propulsion: Ion and Hall. – New York: John Wiley & Sons, 2008.
9. Zikev M. V., Shagayda A. A. Probe Measurements In Discharge Chamber Of Low-Power Ion Thruster, IEPC-03-120
10. Lovtsov A. S., Kravchenko D. A. // Procedia Engineering. 2017. Vol. 185. P. 326.

Primary electrons trajectories influence on performance efficiency of ion thruster discharge chamber

D. A. Kravchenko and A. S. Lovtsov

Keldysh Research Centre
8 Onezhskaya str., 125438, Moscow, Russia
E-mail: dmitry1204@gmil.com

Received November 1, 2018

Results of simulations of plasma in IT-50 ion thruster discharge chamber are submitted in this paper. The 2D kinetic model based on particle-in-cell technique was used to obtain numerical data, which are in good agreement with experimental ones. Analysis of the results showed correlation between primary electron trajectories and efficiency of the discharge chamber performance. The impact of magnetic system design on primary electron tracks, ion flow distribution and ion production cost was revealed.

Keywords: electric propulsion, ion thruster, plasma, simulation, kinetic model, particle-in-cell, primary electrons.

REFERENCES

1. O. A. Gorskov, V. A. Muravlev, and A. A. Shagayda, *Hall and Ion Thrusters for Spacecraft* (Mashinostoyenie, Moscow, 2008) [in Russian].
2. A. S. Koroteev, A. S. Lovtsov, V. A. Muravlev, M. Y. Selivanov, and A. A. Shagayda, *The European Physical Journal D*. 2017. DOI: 10.1140/epjd/e2017-70644-6
3. S. Mahalingam and J. A. Menart, in *Proc. 47th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*. (San Diego, California, 2011). P. 1–24. – AIAA 2011-6071.
4. R. Wirz and I. Katz, in *Proc. 40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit*. (Fort Lauderdale, Florida, 2004). – AIAA 2004-4107.
5. M. Hirakawa and Y. Arakawa, in *Proc. 23rd International Electric Propulsion Conference*. (Seattle, WA, 1993). – IEPC-93-242.
6. J. J. Szabo, *Fully Kinetic Numerical Modeling of a Plasma Thruster. PhD thesis*. (Massachusetts Institute of Technology, 2001).
7. D. A. Kravchenko, *Prikl. Fiz.*, No. 5, 26 (2015).
8. D. M. Goebel and I. Katz, *Fundamentals of Electric Propulsion: Ion and Hall*. (New York: John Wiley & Sons, 2008).
9. M. V. Zikeyev and A. A. Shagayda, *Probe Measurements In Discharge Chamber Of Low-Power Ion Thruster* (IEPC-03-120).
10. A. S. Lovtsov and D. A. Kravchenko, *Procedia Engineering* **185**, 326 (2017).