

УДК 537.525

Механические характеристики плазмы катодного факела низкоиндуктивной вакуумной искры

С. П. Горбунов, В. Л. Красов, В. Л. Паперный
Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Россия

Ю. В. Коробкин, И. В. Романов
Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

Экспериментально исследовались механические характеристики катодного плазменного факела низковольтного вакуумного искрового разряда. Времяпролетным способом измерялась средняя массовая скорость плазмы катодного факела, с помощью баллистического маятника оценивался механический импульс плазмы. Показано, что скорость и импульс растут с увеличением напряжения накопителя и амплитуды разрядного тока, так что в разряде с медным катодом скорость достигает $8 \cdot 10^4$ м/с, импульс — 25 мкН·с при амплитуде разрядного тока и напряжении накопителя, равных 14 кА и $2,4$ кВ, соответственно. Найденные из эксперимента значения удельной тяги и КПД плазменного движителя на основе данного разряда более чем в три раза превышают ранее полученные величины для дугового разряда.

В последние годы ведутся интенсивные исследования возможности применения вакуумного дугового разряда в качестве плазменного движителя для микро- и наноспутников [1, 2]. В области малых габаритов и тяги такие источники имеют существенные преимущества по сравнению с широко используемыми в настоящее время ускорителями газовой плазмы холловского типа: отсутствие нагреваемых и эродирующих элементов (кроме, естественно, катода); простая конструкция, в частности, отсутствие емкости для хранения рабочего тела (газа); широкий диапазон атомных масс металлов, вплоть до урана, используемых в качестве рабочего тела; простая система питания и управления величиной тяги. Однако в вакуумно-дуговых разрядах с токами в диапазоне сотен ампер скорость катодного плазменного факела практически не зависит от параметров разряда и геометрии катодного промежутка и лежит в диапазоне значений $V = (1-3) \cdot 10^6$ см/с [3]. Вследствие этого в экспериментах со слаботочным (менее 100 А) вакуумно-дуговым источником была получена малая величина удельной тяги ($2,2$ мкН/Вт) и коэффициента полезного действия $\eta = PV/2W < 6\%$ [1], что существенно ограничивает применение таких систем в качестве плазменных движителей (здесь P — импульс плазмы катодного факела, W — потребляемая электрическая мощность). Ранее авторами при исследовании низкоиндуктивного вакуумного искрового разряда был обнаружен эффект генерации катодным факелом в начальной стадии разряда пучков быстрых многозарядных ионов материала катода [4]. Кроме того, был обнаружен эффект значительно увеличения скорости катодной струи при возрастании амплитуды разрядного тока I_a . Так, при увеличении I_a до 10 кА скорость плазменного потока в разряде с медным катодом возрастала до $7 \cdot 10^6$ см/с [5], что почти в шесть раз превышает эту величину для слаботочной

дуги. Полученные результаты указывают на возможность улучшения характеристик плазменного движителя на основе искрового разряда по сравнению со стационарной дугой. Для оценки этой возможности в данной работе для широкого диапазона амплитуд разрядного тока проведены измерения механических параметров (средней скорости, импульса, удельной тяги и КПД) катодного факела искрового разряда с медным катодом, а также скорости факела в разряде с катодами из вольфрама и алюминия.

Экспериментальные результаты

Эксперименты проводились в низкоиндуктивном ($L = 40$ нГ) вакуумном искровом разряде. Электродная система состояла из медного катода — цилиндра диаметром 1 мм и расположенного на расстоянии 9 мм от него анода, находящегося под потенциалом заземленной вакуумной камеры, где поддерживалось остаточное давление $(5-8) \cdot 10^{-6}$ Торр. Накопитель ($C = 2$ мкФ) заряжался до напряжения U_d , после чего на торце катода инициировался разряд с помощью высоковольтного пробоя по поверхности диэлектрической вставки между катодом и поджигающим электродом. Ток разряда, амплитуда которого определялась величиной U_d , измерялся непосредственно в цепи катода. Временное разрешение регистрирующей системы составляло около 40 нс.

Эксперимент проводили в двух вариантах. В первом варианте для измерений скорости ионного потока времяпролетным способом использовалась конструкция разрядной камеры с сетчатым анодом, через который плазма, генерируемая на торцевой поверхности катода, расширялась в дрейфовую трубку длиной $L = 10$ или 36 см. После прохождения трубки ионы регистрировались коллектором, находящимся под отрица-

тельным относительно анода потенциалом, равным – 200 В, при котором регистрировался ионный ток насыщения. Во втором варианте для измерения механического импульса катодной струи использовался кольцевой анод с центральным отверстием диаметром 10 мм, в которое из межэлектродного промежутка вытекала плазменная струя. Непосредственно за анодом располагался баллистический маятник в виде металлического диска массой 0,35 г, подвешенного на заземленной проволочке. Под действием плазмы катодной струи диск отклонялся, и по углу отклонения оценивался механический импульс, сообщенный диску струей.

Результаты времяпролетных измерений для разных длин дрейфовой трубки приведены на рис. 1, из которого видно, что в плазме катодного факела регистрируются две группы ионов. Меньшую задержку относительно начала разряда имеет быстрая ионная компонента, большая задержка соответствует медленной компоненте. Анализ данных показал, что быструю компоненту составляют многозарядные ионы материала катода, генерируемые в начальной стадии разряда [6]. Медленная компонента представляет собой основную часть ионов плазмы катодной струи, средняя скорость этой компоненты при малой амплитуде разрядного тока близка к стандартной скорости ионов в вакуумной дуге [5].

С ростом амплитуды разрядного тока средние скорости обеих компонент также возрастают. Для данных исследований важно, что число быстрых ионов в импульсе, пропорциональное площади под соответствующей частью осциллограммы, как видно из рис. 1, б, даже с учетом более высокого среднего заряда составляет заметную часть (несколько десятков процентов) полного ионного потока. Поэтому принимая во внимание, что скорость быстрых ионов в 3–5 раз превышает скорость основной компоненты, необходимо учитывать их вклад в полный механический импульс катодной струи.

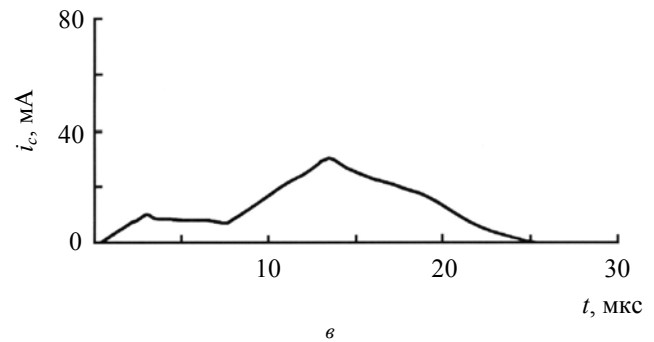
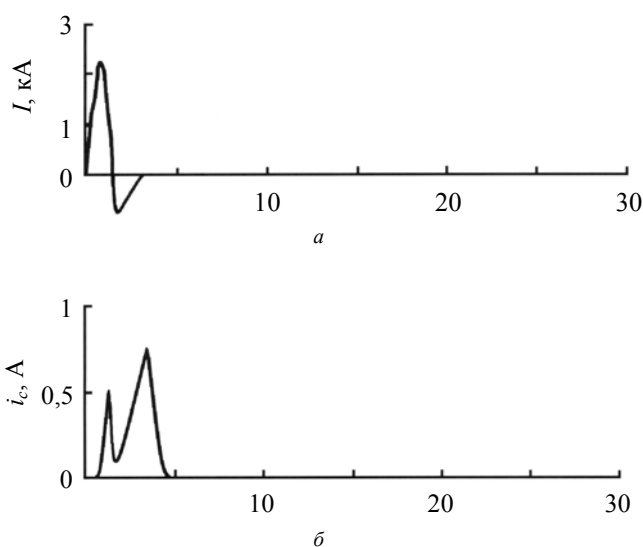


Рис. 1. Осциллограммы:

а — тока разряда; б, в — сигналов ионного тока с коллектора при длине дрейфовой трубки 10 и 36 см, соответственно

При заданном значении напряжения накопителя и определяемой им амплитуды разрядного тока скорости обеих ионных компонент были вычислены путем усреднения данных, полученных из набора осциллограмм. Скорость основной компоненты определяли по времени задержки максимума соответствующего сигнала на осциллограмме тока коллектора относительно момента достижения первого максимума разрядного тока, когда согласно эктонной модели достигается также максимум ионного тока. Скорость быстрой компоненты определялась по времени задержки максимума соответствующего сигнала относительно момента $t_0 = 300$ нс после начала разряда. Вблизи этого момента, как показали предыдущие эксперименты, генерируются пучки быстрых многозарядных ионов [4]. Определение скорости проводилось лишь для случая дрейфовой трубки длиной $L = 36$ см, где эта процедура имеет удовлетворительную точность (около 20 %).

Из скоростей ионных компонент, найденных описанным способом, находилась средняя массовая скорость плазмы катодного факела \bar{V}_m , при этом учитывалось относительное содержание обоих видов ионов, которое оценивалось по коллекторному сигналу для $L = 10$ см. Рис. 2 показывает, что скорость существенно увеличивается с ростом амплитуды разрядного тока. Здесь же приведены результаты измерения механического импульса факела P , полученные по величине отклонения баллистического маятника. Предполагалось, что плазменный факел полностью передает свой импульс маятнику и пренебрегалось возможное отражение ионов от поверхности маятника. Из рис. 2 видно, что импульс растет с увеличением амплитуды разрядного тока и достигает 25 мкН·с в одиночном разряде при амплитуде тока, равной 14 кА. Рост импульса обусловлен как ростом массовой скорости плазмы, так и увеличением переносимой катодным факелом в разряде массы материала катода M . Как показали измерения, величина M в диапазоне изменения параметров разряда оказалась пропорциональной заряду накопителя Q : $M = \gamma Q$, где γ — параметр эрозии остается почти постоянным и близким к величине, измеренной ранее в дуге: $\gamma \approx 60\text{--}80$ мкг/Кл [7]. Следует однако отметить, что найденные в эксперименте значения импульса могут быть завышены вследствие отражения ионов от поверхности баллистического маятника.

Полученные данные позволяют оценить эффективность данного вида разряда в качестве плазменного движителя. Одной из основных характеристик последних является удельная тяга Π , определяемая как отношение силы тяги к электрической мощности, выделяющейся в разряде [1]. В данном случае эта величина оценивается по формуле $\Pi = 2P/CU_d^2$. Зависимость удельной тяги, а также коэффициента полезного действия от напряжения накопителя U_d приведена на рис. 3. КПД определяется как отношение кинетической энергии плазменного факела к электрической энергии, расходуемой разрядом в импульсе: $\eta = P\bar{V}_m / CU_d^2$. Видно, что КПД движителя составляет около 20 % и остается постоянным в диапазоне измерений, в то время как удельная тяга падает с ростом напряжения накопителя.

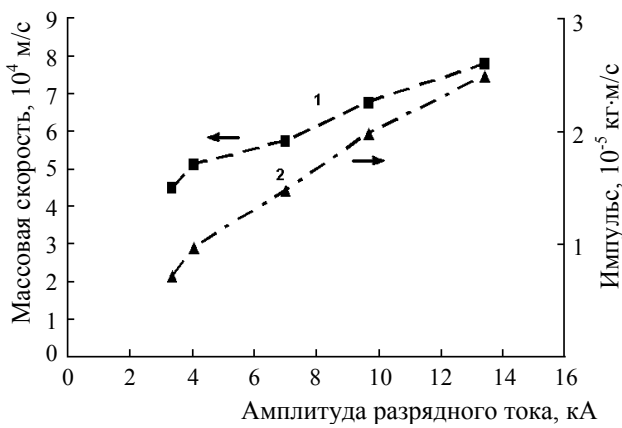


Рис. 2. Зависимости средней массовой скорости (1) и механического импульса (2) плазменного факела от амплитуды разрядного тока

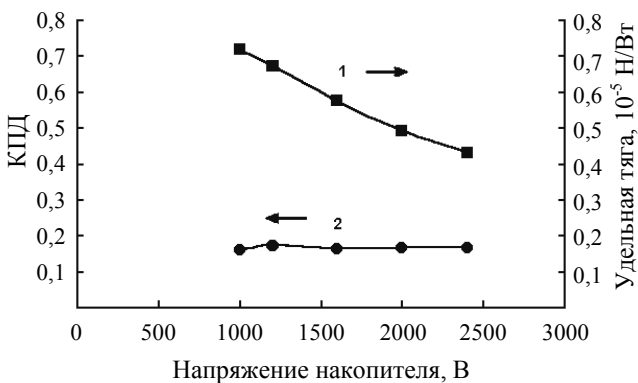


Рис. 3. Зависимости удельной тяги (1) и коэффициента полезного действия движителя на основе данного вида разряда (2) от напряжения накопителя

Измерения механического импульса катодного факела были также проведены для материалов катода с существенно большей (W) и меньшей (Al), чем у меди, величиной атомной массы. Результаты измерений изображены на рис. 4, из которого видно, что эффект увеличения скорости катодного факела в данном разряде по сравнению с дугой наблюдается и для других видов материала катода, в частности, для вольфрама скорость

увеличивается почти в три раза. Однако этот рост оказывается менее значительным, чем для медного катода, и уже при амплитуде разрядного тока 1,5–3 кА скорость практически перестает увеличиваться.

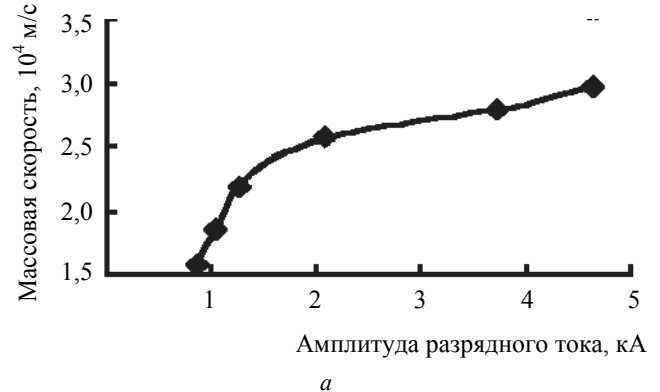


Рис. 4. Зависимости средней массовой скорости плазменного факела от амплитуды разрядного тока для катода: а — из вольфрама; б — из алюминия

Обсуждение результатов

Вышеизложенные результаты показывают, что эффекты генерации пучков быстрых ионов в начальной стадии искрового разряда, а также значительное увеличение скорости основного ионного потока с ростом амплитуды разрядного тока приводят к увеличению механического импульса плазмы катодного факела.

Вследствие этого достигаемые значения эксплуатационных параметров плазменного движителя на основе данного типа искрового разряда (удельной тяги и КПД) оказались более чем в три раза превышающими соответствующие величины для дугового разряда. Приведенные результаты показывают, что с ростом напряжения накопителя и амплитуды разрядного тока энерговклад в разряд, пропорциональный U_d^2 , растет быстрее, чем импульс катодного факела и, соответственно, величина тяги. Поэтому максимальная величина удельной тяги Π наблюдается в области малых значений напряжения накопителя U_d и амплитуды разрядного тока, где мала величина импульса катодной плазмы (см. рис. 2, б). Поскольку коэффициент ионной эрозии почти не зависит от амплитуды разрядного тока, увеличить импульс можно переходом к материалам катода с большей атомной массой (например, урану), а также путем увеличения скорости плазменного факела \bar{V}_m .

Увеличение амплитуды разрядного тока приводит к росту скорости, причем для повышения КПД и удельной тяги двигателя необходимо сохранить малую величину напряжения накопителя, для чего, в частности, следует использовать разрядную цепь с малым волновым сопротивлением $\rho = (L/C)^{1/2}$. Кроме того, скорость катодного факела можно увеличить путем повышения мощности поджига разряда [8, 9]. Скорость быстрой ионной компоненты, дающей заметный вклад в среднюю массовую скорость катодного факела, можно также увеличить путем оптимизации длины межэлектродного промежутка [10]. Использование указанных методов повысит тяговые характеристики плазменного двигателя на основе низкоиндуктивного вакуумного искрового разряда.

Авторы выражают искреннюю благодарность А. С. Шиканову и А. А. Рупасову за поддержку и внимание к данной работе.

Работа выполнена при финансовом участии Российского фонда фундаментальных

исследований (проект № 06-02-16741).
Грант РФФИ № 06-08-01484-а.

Л и т е р а т у р а

1. Schein J., Qi N., Binder R., Krishnan M. et al. // Proc. 27th Int. Electric Propulsion Conf. — Pasadena, CA, 15—19 Oct. 2001. IEPS-01-228.
2. Keidar M., Schein J., Wilson K. et al. // Plasma Sources Sci. Technol. 2005. V. 14, P. 661.
3. Юшков Г. Ю. // Известия вузов. Сер. Физика. 2001. № 9. С. 9.
4. Astrakhansev N. V., Krasov V. I., Paperny V. L. // J. Phys. D: Appl. Phys. 1995. V. 28. P. 2514.
5. Gorbunov S. P., Krasov V. I., Krinberg I. A., Paperny V. L. // Plasma Sources Sci. Technol. 2003. V. 12. № 3. P. 313.
6. Горбунов С. П., Красов В. И., Паперный В. Л. // Прикладная физика. 2005. № 6. С. 60.
7. Daalder J. E. // Physica B+C. 1981. V. 104. № 1. P. 91.
8. Ерохин А. А., Кишинев А. С., Коробкин Ю. В. и др. // ЖЭТФ. 2001. Т. 119. В. 6. С. 1151.
9. Alferov D. F., Korobova N. J., Novikova K. P. et. al. // Proc. XVIIth Int. Symp. Discharge Elect. Insulation Vacuum. — Berkeley. USA. 1996. P. 405.
10. Gorbunov S. P., Krasov V. I., Paperny V. L. // J. Phys. D: Appl. Phys. 1997. V. 30. P. 1922.

Статья поступила в редакцию 18 июля 2006 г.

Macroscopic characteristics of cathode plasma jet of low inductance vacuum spark

S. P. Gorbunov, V. I. Krasov, V. L. Paperny
Irkutsk State University, Irkutsk, Russia

Yu. V. Korobkin, I. V. Romanov
Lebedev Physical Institute RAS, Moscow, Russia

Macroscopic characteristics of cathode plasma jet of low voltage vacuum spark were studied experimentally. The mean velocity of plasma of the cathode jet was studied with a time-of-flight method and a mechanical momentum of the plasma was estimated by means of a ballistic pendulum. It was found that both the velocity and the momentum grow with capacitor voltage and the discharge current amplitude, so that in the discharge with copper cathode the velocity attains of $8 \cdot 10^4$ m/s and the momentum attains of $25 \mu\text{N}\cdot\text{s}$, respectively. The thrust to power ratio and efficiency of plasma thruster on a basis of the discharge exceed more than 3 times the corresponding values that had been obtained earlier at vacuum arcs.