

**Определение скорости плазменной струи малогабаритного магнитоплазменного компрессора с низковольтной системой питания***К. И. Дешко, В. А. Черников*

*Приведены результаты измерений средней скорости истечения плазменной струи, получаемой при помощи малогабаритного магнитоплазменного компрессора (МПК) с низковольтной системой питания. Определены зависимости скорости от давления газа, расстояния от торца плазматрона и амплитуды тока разряда. Показано, что при давлениях  $\lesssim 50$  Торр скорость практически не меняется на расстоянии 5–25 мм от торца плазматрона. Выяснено, что скорость плазменной струи возрастает прямо пропорционально величине разрядного тока.*

*Ключевые слова:* МПК, магнитоплазменный компрессор, импульсный плазматрон, скорость струи, СВЧ диагностика.

**Введение**

Простота конструкции магнитоплазменного компрессора (МПК) [1, 2] и присущая ему возможность получения высокоскоростных струй сильноионизованной плазмы обеспечивают таким плазматронам широкую область применений. Ранее уже было продемонстрировано успешное применение МПК в качестве высокояркого оптического источника в видимом и УФ-диапазонах [1, 2], инжектора для плазменных размыкающих ключей [3], источника плазмы для возбуждения микроплазменных разрядов [4] формирователя ударно-сжатого слоя плазмы для обработки поверхностей материалов [5], запального устройства для поджига газотопливных потоков [6] и др.

Параметры создаваемой МПК плазмы (скорость и форма струи, концентрации и температуры электронов и нейтралов) исследовались экспериментально (напр., [5, 7, 8]) и теоретически [6, 9, 10] во многих работах. Однако практически все указанные исследования относятся к крупногабаритным и сильноточным ( $> 100$  кА) плазматронам. Но во многих задачах [3–6], наоборот, желательно применение слаботочных ( $\leq 10$  кА) плазматронов с минимальными размерами и массой. Параметры

и свойства таких устройств, функционирующих в самых разных условиях, исследованы ещё недостаточно полно.

Целью данной работы являлось измерение средней скорости струи, создаваемой малогабаритным слаботочным МПК в неподвижном воздухе при различных начальных давлениях.

**Экспериментальная установка и метод диагностики**

В качестве плазматрона использовался малогабаритный МПК с диаметрами электродов: внутреннего – 3 мм, внешнего – 5 мм.

Источником питания плазматрона служила накопительная конденсаторная батарея общей ёмкостью  $\sim 2500$  мкФ и рабочим напряжением до 300 В. Инициация разряда осуществлялась системой последовательного высоковольтного поджига. Изменением начального напряжения на накопителе задавалась максимальная амплитуда тока разряда. При наибольшем напряжении (300 В) она составляла  $\sim 7$  кА. Длительность разряда составляла  $\sim 300$  мкс, при этом разряд был аperiodическим и максимум тока достигался на 15-й микросекунде.

Для определения скорости использовался метод СВЧ-зондирования, основанный на эффекте отсечки. Для этого в плоскости, перпендикулярной оси плазматрона и удалённой от его торца на некоторое расстояние, располагался СВЧ-зонд, регистрировавший прохождение сильноионизованной плазмы по факту резкого ослабления сигнала из-за отражения и поглощения СВЧ-излучения в плазме. Измерялась задержка распро-

---

Дешко Кирилл Игоревич, физик.  
Черников Владимир Антонович, доцент, к.ф.-м.н.  
Тел. 8(495) 939-38-85.  
E-mail: kir.deshko@gmail.com, vachernikov@rambler.ru  
Московский государственный университет  
им. М. В. Ломоносова, Физический факультет.  
Россия, 119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, 1, стр. 2.

Статья поступила в редакцию 30 ноября 2017 г.

© Дешко К. И., Черников В. А., 2018

странения, т. е. время от начала разряда МПК до прихода плазмы в плоскость зонда при различном расстоянии между зондом и плазмотроном. По измеренной задержке определялась скорость плазменной струи.

Ясно, что разные области плазменного факела могут иметь различную скорость движения. Так, например, известно [10], что первые порции плазмы, ускоряемые в течение  $\approx 1$  мкс после начала разряда, имеют плотность на несколько порядков ниже, а скорость – на порядок выше по сравнению с соответствующими средними значениями за всё время работы плазмотрона. Вместе с тем, в большинстве применений основной интерес представляет именно средняя скорость истечения плотной плазмы. Поэтому в настоящей работе будем говорить о средней скорости струи, понимая под этим скорость распространения плазмы с концентраций электронов, достаточной для отсечки.

Зонд представлял собой отрезок двухпроводной линии, подключённой одним концом к генератору СВЧ-сигнала, а другим – к поглощающему детектору, который регистрировал прошедшее излучение. Во время разряда линия пронизывалась плазменным факелом. При этом прохождение через плоскость линии сильноионизованной плазмы приводило к существенному уменьшению регистрируемого излучения (отсечке). Во всех описываемых экспериментах частота СВЧ-излучения составляла 16 ГГц, а прохождение плотной плазмы определялось по снижению СВЧ-сигнала, пропорционального интенсивности излучения, в 2 раза (уровень ослабления по мощности –3 дБ).

Типичные осциллограммы разрядного тока и прошедшего через линию СВЧ-сигнала представлены на рис. 1.

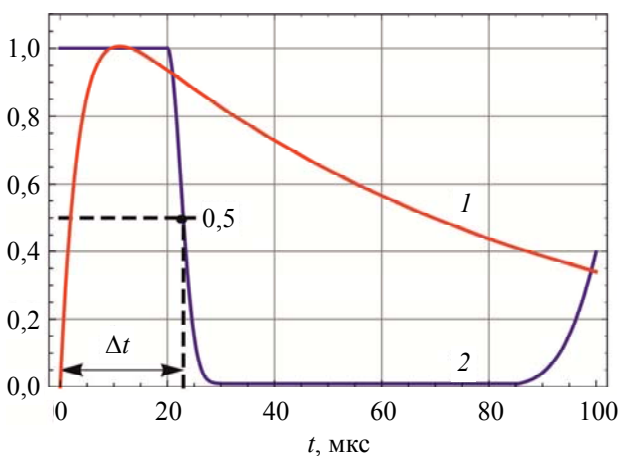


Рис. 1. Осциллограммы тока МПК (кривая 1) и интенсивности прошедшего СВЧ-излучения (кривая 2). Обе кривые нормированы на свои максимальные значения. Пунктиром отмечена задержка прохождения  $\Delta t$  плазмы до плоскости зондовой линии.

Линия была изготовлена из вольфрамовых проволок диаметром 50 мкм, натянутых параллельно друг другу на расстоянии 10 мм. Проведённое численное моделирование показало, что такой зонд обладает достаточным ( $\sim 1$ – $2$  мм) пространственным разрешением. Кроме того, малый диаметр проволок приводит к минимальному возмущению плазмы, а их материал позволил при малом диаметре обеспечить необходимое натяжение проволочек.

МПК вместе с зондовой линией помещался в вакуумную камеру. При этом ввод плазмотрона позволял плавно перемещать его в осевом направлении. Таким образом, расстояние от торца МПК до плоскости зондирующей линии можно было изменять в пределах 5–25 мм без разгерметизации системы.

Измерения проводились в среде воздуха при давлениях от 50 Торр до атмосферного (730 Торр).

### Результаты измерений

Результаты измерений скорости струи в зависимости от начального давления и расстояния от торца плазмотрона представлены на рис. 2, а, б.

Как следует из представленных зависимостей, скорость распространения плазменной струи существенно зависит от давления (см. рис. 2, а) и с уменьшением давления она, как и следовало ожидать, возрастает. В тоже время наблюдается несколько иная зависимость скорости струи от расстояния  $d$  между торцом МПК и зондом (рис. 2, б). А именно, при малых давлениях ( $\sim 50$  Торр) скорость практически не зависит от расстояния. Далее, по мере увеличения давления (область 100–150 Торр), появляется слабо выраженная зависимость скорости от расстояния. При дальнейшем росте давления наблюдается характерное падение скорости струи при увеличении расстояния между плоскостью зонда и торцом плазмотрона.

Такие неоднозначные зависимости скорости распространения плазмы МПК от расстояния до торца плазмотрона при различных давлениях можно объяснить на основании следующих простых рассуждений. При низких давлениях в камере скорость движения плазменной струи столь высока, что плазма пролетает интервал измерения ( $\sim 25$  мм) за время порядка нарастания разрядного тока. В этом случае потери энергии струи при ее расширении компенсируются энерговкладом в струю в результате действия разрядного тока.

При росте начального давления в камере плазма достигает плоскости зонда уже на этапе спада разрядного тока и, следовательно, уменьшения энерговклада в струю. Это приводит к некоторому уменьшению скорости распространения

струи (см. рис. 2, б, зависимости для 100 и 150 Торр). При давлениях в камере более 300 Торр время задержки становится сравнимым с длительностью

тока разряда; в результате скорость струи начинает падать непосредственно у торца плазматрона, что и наблюдается в экспериментах.

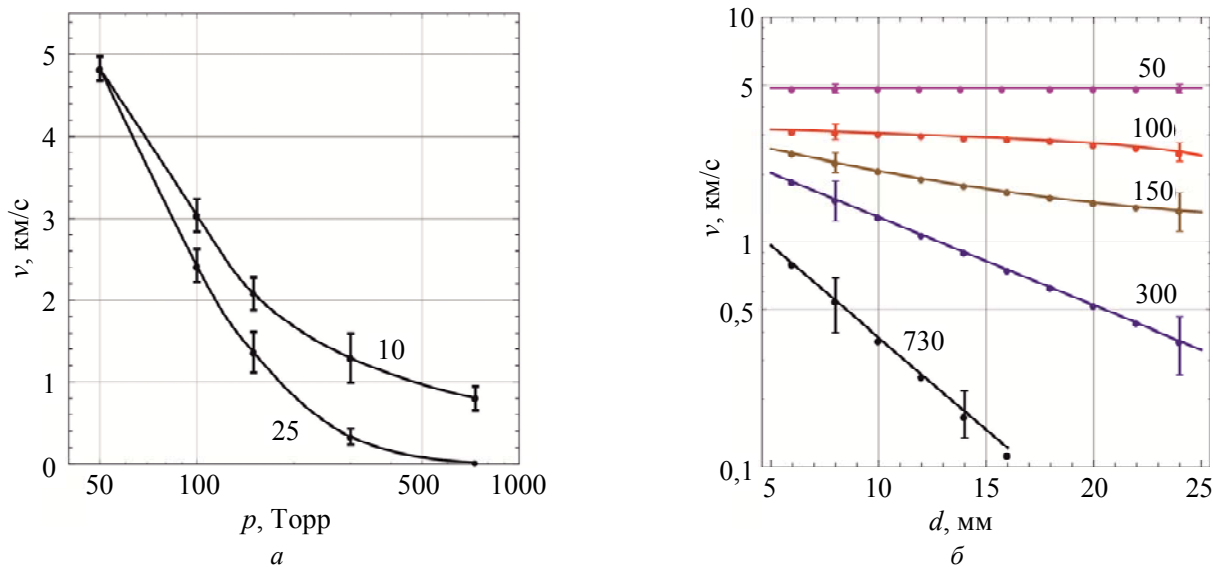


Рис. 2. Экспериментальные результаты: а – зависимость скорости струи  $v$  от давления  $p$ ; б – скорость струи в зависимости от расстояния  $d$ . Числами у кривых указаны: на рис. а) – расстояние [мм], на рис. б) – давление [Торр]; точки – эксперимент, кривая – интерполяция.

На рис. 3 приведена зависимость скорости распространения плазменной струи от амплитуды тока разряда МПК, которая была получена при давлении в камере 50 Торр. Как следует из представленного графика, наблюдается практически линейный рост скорости струи при увеличении тока разряда.

1—7 кА, имеют характерную скорость порядка нескольких километров в секунду.

Скорость существенно зависит от давления; с уменьшением давления она увеличивается. В области малых давлений ( $\approx 50$  Торр) скорость остаётся практически постоянной на расстоянии 5—25 мм от торца плазматрона. С ростом амплитуды разрядного тока скорость пропорционально увеличивается.

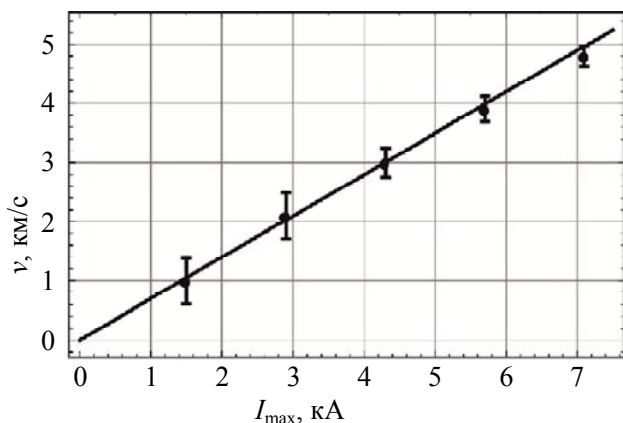


Рис. 3. Зависимость скорости струи  $v$  от амплитуды тока разряда МПК  $I_{max}$ . Давление 50 Торр; точки – эксперимент, прямая – аппроксимация.

### Заключение

Плазменные струи, создаваемые малогабаритным магнитоплазменным компрессором с низковольтной системой питания в воздухе при пониженном давлении и амплитуде разрядного тока

Полученные результаты хорошо согласуются с литературными данными [5–10] с учётом различий в геометрии плазматронов, а также с известной [10] теоретической зависимостью  $v \sim I_{max} / \sqrt{p}$ , где  $I_{max}$  — амплитуда разрядного тока;  $p$  — начальное давление газа.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Камруков А. С., Козлов Н. П., Протасов Ю. С. Плазодинамические источники излучения высокой спектральной яркости. В кн. «Радиационная плазодинамика» — М.: Энергоатомиздат, 1991.
2. Александров А. Ф., Рухадзе А. А. Физика сильноточных электроразрядных источников света. — М.: Атомиздат, 1976.
3. Opening Switches. Ed. By A. Guenther, M. Kristiansen and T. Martin. - N.Y.: Plenum press, 1987.
4. Иванов В. А., Сахаров А. С., Коньжнев М. Е. // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1. № 6. С. 697.
5. Асташинский В. М., Кузьмицкий А. М., Мищук А. А. // Журнал прикладной спектроскопии. 2011. Т. 78. № 3. С. 404.
6. Ершов А. П., Колесников Е. Б., Тимофеев И. Б., Черников В. А., Чувашев С. Н., Шибков В. М. // ТВТ. 2006. Т. 44. № 4. С. 485.

7. Протасов Ю. С., Чувашев С. Н., Щепанюк Т. С. // ТВТ. 1990. Т. 28. № 3. С. 444. [Protasov Yu.S., Chuvashov S.N., Shchepanyuk T.S. // High Temperature. 28 No 3 (1990), P. 328].

8. Волколупов Ю. Я., Красноголовец М. А., Остриж-ной М. А., Нестеренко В. Г. Харченко О. И., Чумаков В. И. // Журнал технической физики (Украина). 2001. Т. 1. № 8. С. 112.

9. Камруков А. С., Козлов Н. П., Чувашев С. Н. // ТВТ. 1984. Т. 22. № 4. С. 789. [Kamrukov A.S., Kozlov N.P., Chuvashov S.N. // High Temperature. 22 No. 4 (1984), P. 638].

10. Калмыков А. А. Импульсные плазменные ускорители. В кр. «Физика и применение плазменных ускорителей», под ред. А. И. Морозова. – Минск: Наука и техника, 1974.

PACS: 52.50.Dg, 52.59.Dk

## Measurements of the plasma jet velocity from a miniature magneto-plasma compressor with the low-voltage power supply system

*K. I. Deshko and V. A. Chernikov*

M. V. Lomonosov Moscow State University  
Bld. 2, 1 Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia  
E-mail: kir.deshko@gmail.com; vachernikov@rambler.ru

*Received November 30, 2017*

***Results of the plasma jet average speed measurements are obtained using a miniature magnetized plasma compressor (MPC) with the low-voltage power supply system as a plasma source. Plasma jet velocities were measured in dependence of the initial gas pressure, distance from MPC and discharge current. It is shown that at low pressures ( $\lesssim 50$  Torr) the speed remains virtually unchanged at a distance of 5-25 mm from MPC edge and increases in direct proportion to the discharge current amplitude. The measured speed value was about 5 km/s at a current amplitude of 7 kA.***

***Keywords:*** MPC, magnetized plasma compressor, pulsed plasma source, plasma jet velocity, microwave plasma diagnostics.

### REFERENCES

1. A. S. Kamrukov, N. P. Kozlov, and U. S. Protasov, *Plasma-dynamic radiation sources with high spectral brightness*, in Book: *Radiation Plasma-Dynamic* (EnergoAtomIzdat, Moscow, 1991) [in Russian].
2. A. F. Aleksandrov and A.A. Rukhadze, *Physics of high current electric discharge light sources*. (Atomizdat, Moscow, 1976) [in Russian].
3. *Opening Switches*. Ed. By A. Guenther, M. Kristiansen and T. Martin. (Plenum press, N.Y., 1987).
4. V. A. Ivanov, A. S. Sakharov, and M. E. Konyzhev, *Usp. Prikl. Fiz.* **1** (6), 697 (2013).
5. V. M. Astashinsky, A. M. Kuzmitsky, and A. A. Mishchuk, *Zhurnal Prikl. Spektroskop.* **78** (3), 404 (2011).
6. A. P. Ershov, E. B. Kolesnikov, I. B. Timofeev, V. A. Chernikov, S. N. Chuvashov, and V. M. Shibkov, *High Temperature* **44** (4), 477 (2006).
7. Yu. S. Protasov, S. N. Chuvashov, and T. S. Shchepanyuk *High Temperature* **28** (3), 328 (1990).
8. Yu. Ya. Volkolupov, M. A. Krosnogolovets, M. A. Ostrizhnoy, V. G. Nesterenko O. I. Kharchenko, and V. I. Chumakov, *Zhurnal Tekhnich. Fiz. (Kharkov, Ukraine)* **1** (8), 112 (2001).
9. A. S. Kamrukov, N. P. Kozlov, and S. N. Chuvashov, *High Temperature* **22** (4), 638 (1984).
10. A. A. Kalmykov. *Pulsed plasma accelerator*, in Dook: *Physics and Applications of Plasma Accelerators*. Ed. A. I. Morozov. (Nauka i Tekhnika, Minsk, 1974) [in Russian].