

Особенности продольного распределения параметров плазмы начального участка сверхзвуковой струи из импульсного капиллярного разряда

А. В. Ефимов, А. С. Пащина, В. Ф. Чиннов, П. Н. Казанский

Представлены результаты спектроскопического исследования начального участка сверхзвуковой плазменной струи, формируемой импульсным разрядом в капилляре из углеродсодержащего полимера. Зарегистрированные с высоким временным (1–50 мкс) и пространственным (30–50 мкм) разрешением излучательные свойства высокотемпературного ядра струи (интенсивность и контур бальмеровских линий H_α и H_β , относительные интенсивности ионных линий $C II$) позволили выявить особенности продольного распределения плотности и температуры электронов, вызванные неизобаричностью начального участка струи при сверхзвуковом ее истечении.

Ключевые слова: импульсный разряд, капилляр, абляция, спектроскопия, сверхзвуковая струя, концентрация электронов, температура.

Введение

Импульсный разряд в капилляре с аблирующей стенкой связан с большим кругом прикладных задач, требующих получения высокоэнтальпийных потоков плотной плазмы [0, 2] и, в частности, плазменных струй [3–8]. Характер течения плазменных струй – ламинарный или турбулентный – существенно зависит от параметров плазмы и ее компонентного состава, которые, в свою очередь, определяются физико-химическими свойствами аблирующего вещества стенки капилляра, его геометрией, параметрами разрядного импульса, химическим составом и параметрами атмосферы окружающего газа. Ламинарные струи характеризуются резко выраженными границами, слабой расходимостью или полным ее отсутствием, устойчивостью в потоке газа, большой длиной начального участка, достигающей 200 и более калибров относительно диаметра капилляра [4, 5, 9–12].

При использовании капилляров, выполненных из углеродсодержащих полимеров, ламинар-

ный характер течения удается поддерживать в достаточно широком диапазоне мощностей разрядного импульса, обеспечивающих формирование как дозвуковых, так и сверхзвуковых струй. Однако физическая природа свойств таких плазменных струй в настоящее время понятна ещё не до конца.

Проведенные нами исследования плазменной струи в дозвуковом режиме истечения с использованием спектроскопии высокого пространственного и временного разрешения и детальный анализ состояния плазмы [13] позволили расширить и дополнить имеющиеся общие представления о параметрах и динамике эрозионной плазмы, получаемой в капиллярном разряде при характерных значениях мощности порядка $N \approx 10$ кВт. Дальнейшие наблюдения показали, что кратное увеличение (до 10-ти раз) мощности разряда приводит к переходу струи в сверхзвуковой режим течения, характеризующийся существенно неоднородным распределением давления [14]. Роль неизобаричности особенно сильно выражена на начальном участке струи – $z/d \leq 6$ (здесь d , z – диаметр капилляра и расстояние от его среза соответственно). В частности, в области разрежения минимум электронной концентрации достигается в приосевой зоне струи, где ее значение в два и более раз ниже максимальных значений, достигаемых на периферии – в окрестности висячего скачка [15]. Интенсивность линий однократно ионизованных атомов меди и углерода в приосевой зоне начального участка оказывается выше интенсивности линий возбужденных атомов, а измеряемая электронная температура достигает зна-

Ефимов Александр Валерьевич, научный сотрудник.
 Пащина Анатолий Степанович, заведующий лабораторией.
 Чиннов Валерий Федорович, главный научный сотрудник.
 Казанский Павел Николаевич, старший научный сотрудник.
 Объединенный институт высоких температур РАН.
 Россия, 125412, Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2.
 Тел. +7(926) 616-96-97. E-mail: axletter@gmail.com

Статья поступила в редакцию 2 февраля 2018 г.

© Ефимов А. В., Пащина А. С., Чиннов В. Ф.,
 Казанский П. Н., 2018

чений $T_e \sim 2-3$ эВ и превышает «нормальную температуру» [16] ($T_e \sim 1,5-2,3$ эВ) основных излучающих атомных компонент (Н I, С I и Cu I). В то же время в периферийной зоне струи кратное увеличение энерговклада не приводит к существенному изменению спектрального состава излучения. В этой зоне наблюдаются спектральные линии возбуждённых атомов химических элементов, входящих в состав аблирующего вещества стенки капилляра, материала внутреннего и внешнего электродов, а также молекулярные полосы – фиолетовая система полос радикала CN (продукт плазмохимических превращений аблирующего вещества стенки капилляра и воздуха), система полос Свана радикала C_2 (материал стенки капилляра) и система полос AlO (материал внешнего электрода). Наблюдается отрыв электронной температуры ($T_e \approx 1,0-1,2$ эВ) от колебательной ($T_v \approx 0,7-0,8$ эВ) и вращательной ($T_r \approx 0,4-0,6$ эВ) температур.

Настоящая работа является продолжением исследований, начатых в [13–15]. Целью работы являлось получение продольных профилей электронной концентрации и температуры на начальном участке сверхзвуковой плазменной струи, где влияние неизобаричности течения выражено особенно сильно, на основе методов количественной спектроскопии, обеспечивающих возможность синхронной регистрации этих профилей в течение одного разрядного импульса.

Исследуемый объект

Конструкция разрядника, схема экспериментальной установки и методы проведения исследований подробно описаны в работах [13, 14]. Сверх-звуковая плазменная струя инициируется импульсным разрядом в капилляре, стенки которого выполнены из углеродсодержащего полимера ПММА ($C_5H_8O_2$). Струя инжектируется в атмо-

сферу воздуха при давлении $p = 1$ атм. Диаметр капилляра и его глубина составляют $d = 1-1,6$ мм и $h = 4$ мм соответственно.

Исследования проведены при следующих параметрах разрядного импульса: энергия емкостного накопителя $Q \sim 80$ Дж, амплитуда разрядного тока $I_p \sim 350-400$ А, падение напряжения на разрядном промежутке $U_p \sim 200-250$ В, длительность разрядного импульса $t_p \sim 1$ мс, пиковое значение мощности разряда $N \sim 100$ кВт. Этим условиям соответствуют следующие значения газодинамических параметров, оценка которых получена на основе результатов оптической визуализации потока и путем анализа ударно-волновых структур: число Маха $M \sim 1,8-2$, степень нерасчетности $n = p_{\text{вых}}/p_{\infty} \sim 5-6$, скорость головной части струи $v_f \sim 300-330$ м/с, давление внутри капилляра $p_{\text{кап}} \sim 10-12$ атм, давление на срезе капилляра $p_{\text{вых}} \sim 5$ атм. Общий вид начального участка струи, на котором хорошо просматриваются появляющиеся при этих параметрах висячий скачок уплотнения, отраженная ударная волна, диск Маха, точка тройной конфигурации [17], представлен на рис. 1.

Характерный спектр излучения плазмы в середине разрядного импульса (момент, соответствующий максимальной мощности разряда) из пространственной области, расположенной перед центральным скачком уплотнения, представлен на рис. 2. На вкладыше рисунка пунктиром отмечены регистрируемая область и положение кромки капилляра. Отметим наличие в спектре линий однократно ионизованных атомов продуктов деполимеризации капилляра и внутреннего электрода (С II и Cu II) с энергией возбуждения около 20 эВ, что свидетельствует о высокой температуре электронов T_e на этом участке – не менее 2 эВ. Линии однократно ионизованных атомов атмосферы воздуха (N II и O II) не наблюдаются.

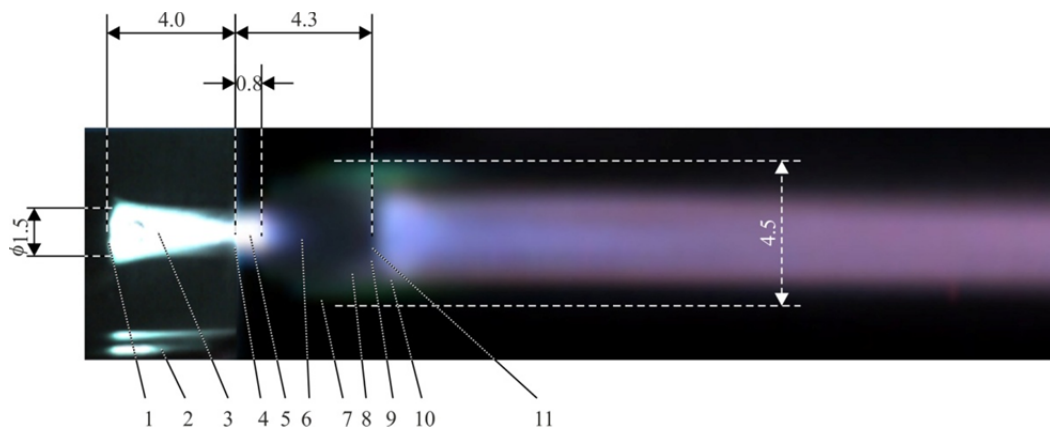


Рис. 1. Общий вид начального участка сверхзвуковой плазменной струи: 1 – анод, 2 – катод, 3 – капилляр, 4 – срез капилляра, 5 – участок расширения, 6 – область разрежения, 7 – граница струи, 8 – висячий скачок уплотнения, 9 – точка тройной конфигурации, 10 – отраженная ударная волна, 11 – центральный скачок уплотнения (диск Маха). Длительность экспозиции видеокамеры $t_{\text{эксп}} = 1$ мкс. Размеры даны в мм.

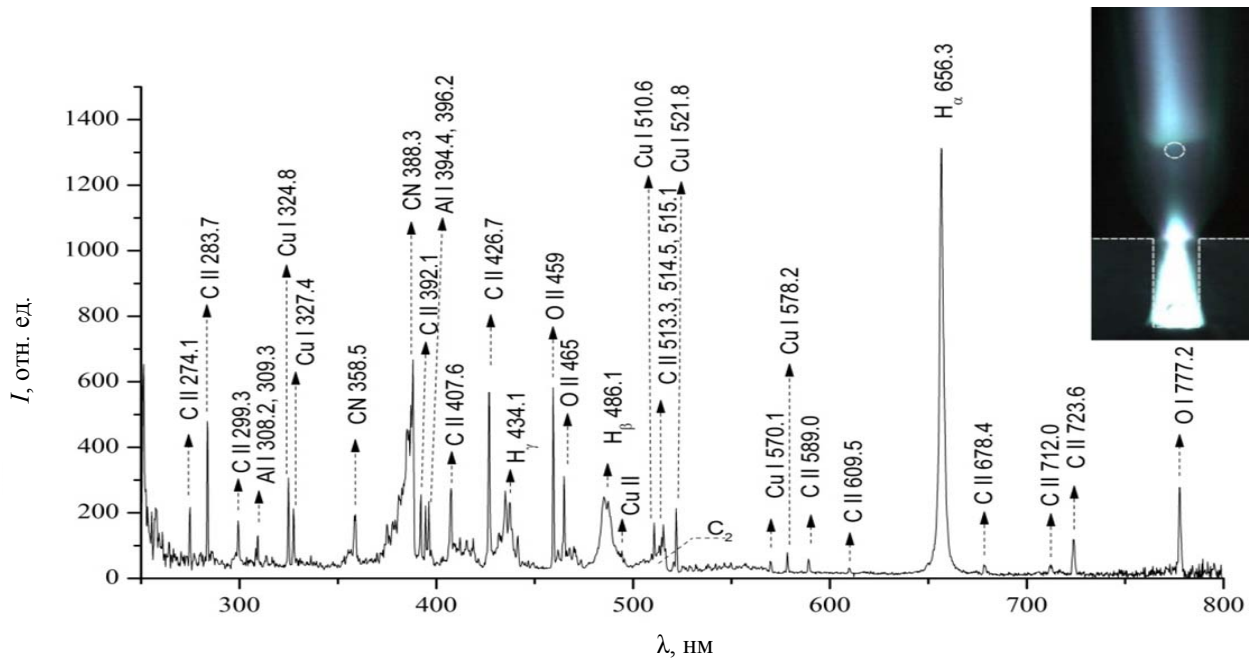


Рис. 2. Спектр излучения плазмы начального участка струи ($z = 3,0$ мм от среза капилляра).

В спектре также присутствуют интенсивные спектральные линии бальмеровской серии водорода H_α , H_β , H_γ , линии возбуждённых атомов углерода, меди, алюминия и молекулярные полосы C_2 , CN. Однако измерение поперечных профилей излучения показывает, что максимумы интенсивности свечения этих спектральных компонент не находятся в «горячей» приосевой зоне и смещены в периферийную область плазменной струи [15].

Пространственная неоднородность плазмы выражается в сильной зависимости её спектра излучения от области регистрации. В наибольшей степени влияние градиента температуры и неизобаричности сверхзвукового течения проявляется в области ударно-волновых структур начального участка струи. Типичные продольные распределения интенсивности линий H_β , Cu II и континуума для этого участка представлены на рис. 3.

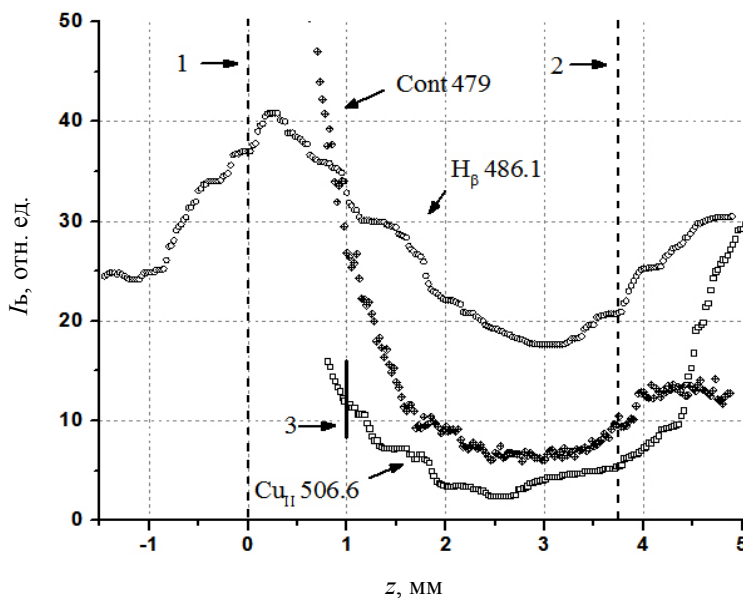


Рис. 3. Продольные профили интенсивности излучения линий H_β , Cu II и континуума. 1 – граница капилляра, 2 – центральный скачок уплотнения, 3 – граница слияния сильно уширенных спектральных линий Cu II с континуумом.

Результаты измерения продольных профилей концентрации и температуры электронов

В высокоэнергетическом режиме разряда возможности выбора спектральных компонент,

пригодных для количественной оценки параметров плазмы внутри капилляра, существенно ограничены вследствие слияния в видимом диапазоне спектра сильно уширенных спектральных линий с континуумом. На начальном участке струи вне

капилляра для определения концентрации электронов n_e использован контур линии H_α (линейный Штарк-эффект [18]). Для определения электронной температуры T_e использованы спектральные линии ионов углерода $C II$ 657 нм и $C II$ 678 нм (метод относительных интенсивностей [19]). Выбор указанных спектральных линий обусловлен несколькими причинами. Во-первых, близкое расположение этих линий на спектральной шкале обеспечивает возможность одновременной их регистрации и, как следствие, построения синхронных профилей концентрации и температуры электронов. Во-вторых, максимум интенсивности

излучения линий ионов углерода $C II$ 657 нм и $C II$ 678 нм наблюдается в приосевой зоне, что позволяет отнести результаты измерения температуры именно к этой пространственной области. В третьих, большое различие энергий возбуждения указанных линий ($\Delta E > 6$ эВ) обеспечивает высокую точность оценок электронной температуры. Измеренные таким образом продольные распределения концентрации и температуры электронов приосевой зоны начального участка струи для диаметра капилляра $d \sim 1,6$ мм ($W \sim 15 \div 20$ МВт/см³) представлены на рис. 4.

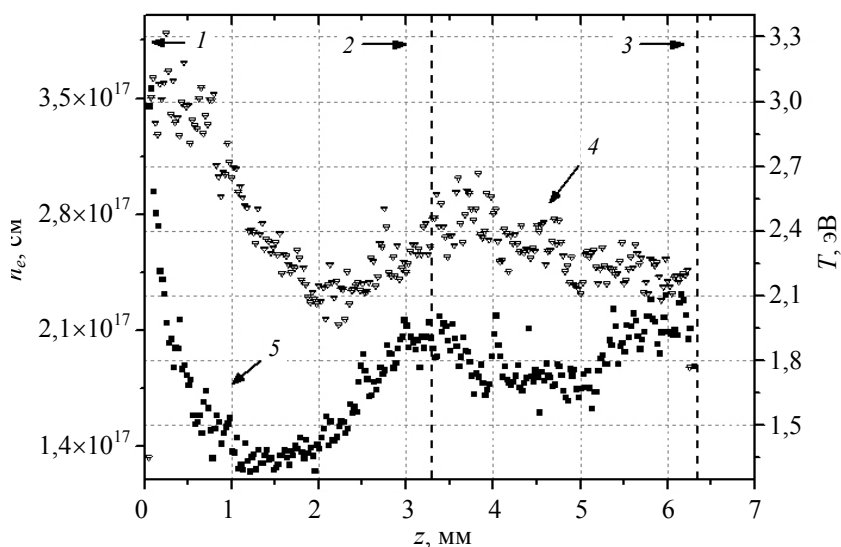


Рис. 4. Продольное распределение температуры и концентрации электронов для диаметра капилляра $d \sim 1,6$ мм. 1 – капилляр, 2, 3 – центральный скачок уплотнения (диск Маха), 4 – T_e ($C II$ 657/ $C II$ 678), 5 – $n_e(H_\alpha)$.

Максимальные значения температуры и концентрации электронов $T_e \sim 3,3$ эВ и $n_e \sim 3,5 \times 10^{17}$ см⁻³ зарегистрированы в окрестности среза капилляра. Минимум концентрации электронов достигается на расстоянии $z = 1,5$ мм от границы капилляра и составляет $n_e^{\min} \sim 1,3 \times 10^{17}$ см⁻³. Минимум электронной температуры расположен чуть далее – на расстоянии $z(T_e^{\min}) \sim 2,1$ мм, где ее значение составляет $T_e^{\min} \sim 2,1$ эВ. В области за диском Маха наблюдается рост температуры и концентрации электронов, где их значения достигают $T_e^{\max} \sim 2,5$ эВ и $n_e^{\max} \sim 2,1 \times 10^{17}$ см⁻³ соответственно. На более дальних расстояниях температура и концентрация электронов вновь снижаются, опускаясь к локальным минимумам ($T_e^{\min} \sim 2,1$ эВ, и $n_e^{\min} \sim 1,7 \times 10^{17}$ см⁻³) следующего звена ударно-волновой структуры. Можно видеть, что при этом локальные экстремумы профилей концентрации и температуры электронов смещены друг относительно друга. Данный факт наблюдался неоднократно для стационарных плазменных струй и обусловлен заметным вкладом электронной теплопроводности в общий баланс энергии [17].

Закключение

В работе экспериментально измерены профили концентрации n_e и температуры T_e электронов приосевой зоны начального участка ($z \sim 6$ мм) импульсно-эрозионной ($t_p \sim 1$ мс, $C_5H_8O_2$) плазменной струи малого масштаба ($d \sim 1,6$ мм), которые отражают ход газодинамических параметров и особенности ударно-волновой структуры сверхзвукового течения. Выбор для диагностики близко расположенных линий водорода H_α и ионов углерода $C II$ 657 (16,33 эВ) и $C II$ 678 (22,53 эВ), а также удачное сочетание свойств излучающих компонент (большая разность энергий между уровнями возбуждения линий ионов углерода и достижение максимума интенсивности излучения в приосевой зоне струи), обеспечивают возможность синхронной регистрации профилей концентрации и температуры электронов и высокую точность определения температуры электронов в приосевой зоне разряда. Значения концентрации и температуры электронов, измеренные вдоль начального участка плазменной струи, варьируются в диапазоне $n_e^{\min} \sim (1,3 \times 10^{17} - 3,5 \times 10^{17})$ см⁻³ и $T_e \sim 2,1 - 3,3$ эВ соответственно. Отметим, что

близкие значения оценок температуры электронов в этой области $T_e \sim 2,4$ эВ получены с использованием ионных линий меди – Cu II 248,9 нм ($E^* = 8,23$ эВ) и 254,4 нм ($E^* = 13,38$ эВ), – наблюдаемых в ультрафиолетовой области спектра [14]. Измеренные профили концентрации и температуры электронов качественно согласуются с продольным ходом газодинамических параметров (давления, числа Маха) вдоль оси сверхзвуковой струи и отражают особенности неизобаричного течения, характерного для ее начального участка [17].

Использование спектроскопического облучения высокого пространственно-временного разрешения и одновременное определение n_e и T_e методами количественной эмиссионной спектроскопии составляет хорошую основу для диагностики мелкомасштабных пространственно неоднородных плазменных объектов и может найти применение при исследовании разнообразных нестационарных движущихся плазменных объектов в технологических и аэрофизических приложениях.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ, грант №16-38-00927 мол_а.

ЛИТЕРАТУРА

1. Минько Л. Я. Получение и исследование импульсных плазменных потоков. – Минск: Наука и техника, 1970.
2. Огурцова Н. Н., Подмошенский И. В., Шелемина В. М. // ТВТ. 1968. Т. 6. № 1. С. 48.
3. Leonov S., Nebolsin V., Shilov V. / Proc. I Int. Work. Perspect. MHD Plasma Technol. Aerosp. Appl. (ed. V. Bityurin), (IVTAN, Moscow, 1999). P. 58–65.
4. Авраменко Р. Ф., Николаева В. И., Поскачеева Л. П. В сб. "Шаровая молния в лаборатории". Ред. Авраменко Р. Ф., Климов А. И., Синкевич О. А. – М.: Химия, 1994. С. 15–56.
5. Авраменко Р. Ф., Бахтин Б. И., Николаева В. И., Поскачеева Л. П., Широков Н. Н. // ЖТФ. 1990. Т. 60. № 12. С. 57.
6. Ершов А. П., Колесников Е. Б., Тимофеев И. Б., Черников В. А., Чувашев С. Н., Шибков В. М. // ТВТ. 2007. Т. 45. № 5. С. 646.
7. Ершов А. П., Тимофеев И. Б., Чувашев С. Н., Шибков В. М. В сб. "Шаровая молния в лаборатории". Ред. Авраменко Р. Ф., Климов А. И., Синкевич О. А. – М.: Химия, 1994. С. 112–118.
8. Ершов А. П., Розанов В. В., Сысоев Н. Н., Тимофеев И. Б., Чувашев С. Н., Шибков В. М. // Физическая гидродинамика. Физический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова. 1994. № 4. С. 1–26.
9. Pashchina A. S., Klimov A. I., Efimov A. V. Influence of Nano-Scale Clusters on Gas Dynamics Parameters of Plasma Jet Created by Capillary Type Discharge (AIAA 2014-0517). 52nd Aerospace Sciences Meeting, 2014, p.1–11.
10. Леонов С. Б., Лукьянов Г. А. // ПМТФ. 1994. № 5. С. 13.
11. Пащина А. С., Климов А. И. // Хим. Физика. 2014. Т. 33. № 2. С. 78.
12. Эндер А. Я., Кузнецов В. И., Кольшикин И. Н. // ЖТФ. 2015. Т. 85. № 11. С. 3.
13. Пащина А. С., Ефимов А. В., Чиннов В. Ф. // ТВТ. 2016. Т. 54. № 4. С. 513.
14. Пащина А. С., Ефимов А. В., Чиннов В. Ф. // ТВТ. 2017. Т. 55. № 5. С. 669.
15. Пащина А. С., Ефимов А. В., Чиннов В. Ф., Агеев А. Г. // Прикладная физика. 2016. № 2. С. 29.
16. Larenz R.W., Bartels H. // Naturwissenschaften. 1950. Vol. 37. No. 7. P. 164.
17. Лукьянов Г. А. Сверхзвуковые струи плазмы. – Л.: Машиностроение, 1985.
18. Собоelman И. И. Введение в теорию атомных спектров. – М.: Физ.-мат. лит., 1963.
19. Лохте-Хольтгревен В. В кн. "Методы исследования плазмы". – М.: Мир, 1971. С. 108–168. [W. Lochte-Holtgreven, in Plasma Diagnostics, pp. 108-168 (Amsterdam, North Holland, 1968)].

PACS: 52.70.Kz; 52.75.Hn; 52.35.Tc

Features of longitudinal distribution of plasma parameters at the initial section of a supersonic jet created by the pulsed discharge in a capillary

A. V. Efimov, A. S. Pashchina, V. F. Chinnov, and P. N. Kazanskiy

Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences
Bld. 2, 13 Izhorskaya str., Moscow, 125412, Russia
E-mail: axletter@gmail.com

Received February 2, 2018

The results of spectroscopic investigation of the initial section of a supersonic plasma jet formed by a pulsed discharge in a capillary made of a carbon-containing polymer are presented. The emission properties of high-temperature core of the jet (the intensity and the contour of Balmer lines H_α and H_β , the relative intensities of ionic C II lines) detected with high temporal (1–50 μ s) and spatial (30–50 μ m)

resolution allowed us to identify the features of longitudinal distribution of electron density and temperature, caused by the flow non-isobaricity along the initial section of supersonic jet.

Keywords: pulse discharge, capillary, ablation, spectroscopy, supersonic jet, electron density, temperature.

REFERENCES

1. L. Ya. Min'ko, *Obtaining and Studying the Pulse Plasma Flows* (Nauka i Tekhnika, Minsk, 1970) [in Russian].
2. N. N. Ogurtsova, I. V. Podmoshensky, and V. M. Shelemina, *High Temp.*, **6** (1), 48 (1968).
3. S. Leonov, V. Nebolsin, V. Shilov, in *Proc. I Int. Work. Perspect. MHD Plasma Technol. Aerosp. Appl.* Ed. V. Bityurin (IVTAN, Moscow, 1999), pp. 58–65.
4. R. F. Avramenko, V. I. Nikolaeva, and L. P. Poskacheeva, in *Book: Ball Lightning in Laboratory*, p.p. 15–56 Ed. R. F. Avramenko, A. I. Klimov, O. A. Sinkevich, (Chemistry, Moscow, 1994) [in Russian].
5. R. F. Avramenko, B. I. Bakhtin, V. I. Nikolaeva, L. P. Poskacheeva, and N. N. Shirokov, *Sov. Tech. Phys.* **60** (12), 57 (1990)
6. A. P. Ershov, E. B. Kolesnikov, I. B. Timofeev, V. A. Chernikov, S. N. Chuvashov, and V. M. Shibkov, *High Temp.* **45** (5), 646 (2007).
7. A. P. Ershov, I. B. Timofeev, S. N. Chuvashov, and V. M. Shibkov, in *Book: Ball Lightning in Laboratory*, p.p. 112–118. Ed. R. F. Avramenko, A. I. Klimov, O. A. Sinkevich (Chemistry, Moscow, 1994) [in Russian].
8. A. P. Ershov, V. V. Rozanov, N. N. Sisoiev, I. B. Timofeev, S. N. Chuvashov, and V. M. Shibkov, *Fizicheskaya Gidrodinamika*, (Phys. Fac. Lomonosov MGU), No. 4, 1 (1994).
9. A. S. Pashchina, A. I. Klimov, and A. V. Efimov, in *Proc. 52nd Aerosp. Sci. Meet., AIAA Paper 2014-0517* (American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2014), p. 1–11.
10. S. B. Leonov and G. A. Lukyanov, *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, No. 5, 13 (1994).
11. A. S. Pashchina and A. I. Klimov, *Chem. Phys.* **33** (2), 78 (2014).
12. A. Ya. Ender, V. I. Kuznetsov, and I. N. Kolyshkin, *Tech. Phys.* **85** (11), 3 (2015).
13. A. S. Pashchina, A. V. Efimov, and V. F. Chinnov, *High Temp.* **54** (4), 513 (2016).
14. A. S. Pashchina, A. V. Efimov, and V. F. Chinnov, *High Temp.* **55** (5), 669 (2017).
15. A. S. Pashchina, A. V. Efimov, V. F. Chinnov, and A. G. Ageev, *Prikl. Fiz.*, No. 2, 29 (2016).
16. R. W. Larenz und H. Bartels, *Naturwissenschaften* **37** (7), 164 (1950).
17. G. A. Luk'yanov, *Supersonic Plasma Jets* (Mashinostroyeniye, Leningrad, 1985) [in Russian].
18. I. I. Sobel'man, *Introduction to the Theory of Atomic Spectra* (Moscow: Fizmatgiz, 1963) [in Russian].
19. W. Lochte-Holtgreven, in *Book: Plasma Diagnostics*, pp. 108-168 (Amsterdam, North Holland, 1968; Moscow, Mir, 1971).