

УДК 533.9.08: 536.53

Температурные характеристики апокампа — нового типа плазменной струи в воздухе атмосферного давления

М. В. Андреев, В. С. Кузнецов, В. С. Скакун, Э. А. Соснин, В. А. Панарин, В. Ф. Тарасенко

Проведены экспериментальные исследования температурных характеристик нового типа плазменной струи — апокампа в воздухе атмосферного давления. Для этого предложена и апробирована методика построения «температурных карт», и с её помощью показано, что плазма в апокампе имеет большой температурный градиент с температурой в конце струи около 100 °С при температуре канала разряда около 1300 °С.

PACS: 52.50.Dg

Ключевые слова: апокамп, воздух, плазменная струя атмосферного давления.

Введение

Газоразрядная низкотемпературная плазма является основой множества различных технических устройств и технологических процессов [1]. Чаще всего используется либо неравновесная низкотемпературная плазма ($T_e \gg T_g$) низкого давления (тлеющий разряд, высокочастотные емкостный и индукционный разряды низкого давления, дуговой разряд низкого давления), либо близкая к равновесию низкотемпературная плазма ($T_e \approx T_g$) (высокочастотный индукционный разряд высокого давления, дуговой разряд высокого давления) [2, 3].

В последние годы существенно вырос интерес к исследованиям плазменных струй атмосферного давления (ПСАД), что обусловлено их успешным применением в медицине, микробиологии, цитологии, модифицировании материалов и т.д. [4—8]. Во всех конструкциях источников ПСАД поток (или потоки) плазмы формируется в газовом разряде в некотором ограниченном объеме, после чего выталкивается из объема через уз-

кий капилляр, щель или совокупность отверстий за счет прокачки газа через область разряда и избыточного давления в зоне разряда.

В 2016 г. был открыт феномен *апокампа* (от греч. *από* – от и *κάμψη* – изгиб, поворот), т.е. возникновение плазменных струй, которые формируются в местах усиления электрического поля вблизи изгибов канала импульсно-периодического разряда [9, 10]. Апокамп в воздухе атмосферного давления может иметь форму одиночной игловидной или конической струи длиной до 6—7 см, направленной перпендикулярно месту изгиба токового канала разряда, причем преимущественно вверх (см. рис. 1). В отличие от других известных ПСАД, новый источник не требует принудительной прокачки газа через область разряда.

Для построения теоретической модели апокампа и определения условий его применения необходимо, прежде всего, знать его температурные характеристики. К настоящему времени проведено множество исследований влияния параметров импульсов возбуждения и конструкции источников ПСАД на геометрию плазменной струи и ее спектральные характеристики [4—7]. Значительно меньше внимания уделено измерению энергетических характеристик плазменных струй, включая температурные измерения, в т.ч. построение температурных профилей по сечению струи. Это особенно актуально для работы в молекулярных средах, включая воздух. В таком режиме температура газа может превышать 100 °С [6, 8]. Можно констатировать, что температурные параметры апокампа и формирующего его разряда до настоящего времени систематически не изучались. Цель настоящей работы — восполнить этот пробел, для

Андреев Михаил Владимирович, инженер¹.
Кузнецов Владимир Сергеевич, техник¹, магистрант².
Скакун Виктор Семенович, старший научный сотрудник¹.
Соснин Эдуард Анатольевич, старший научный сотрудник^{1,2}.
Панарин Виктор Александрович, инженер¹, аспирант.
Тарасенко Виктор Федотович, зав. лабораторией¹.

¹ Институт сильноточной электроники СО РАН.
Россия, 634050, Томск, Московский тракт, 2.

² Томский государственный университет.
Россия, 634050, Томск, просп. Ленина, 36.

E-mail: badik@loi.hcei.tsc.ru

Статья поступила в редакцию 10 ноября 2016 г.

© Андреев М. В., Кузнецов В. С., Скакун В. С., Соснин Э. А., Панарин В. С., Тарасенко В. Ф., 2016

чего использованы как контактные, так и бесконтактные методы измерения температуры, и проведено сравнение полученных результатов.

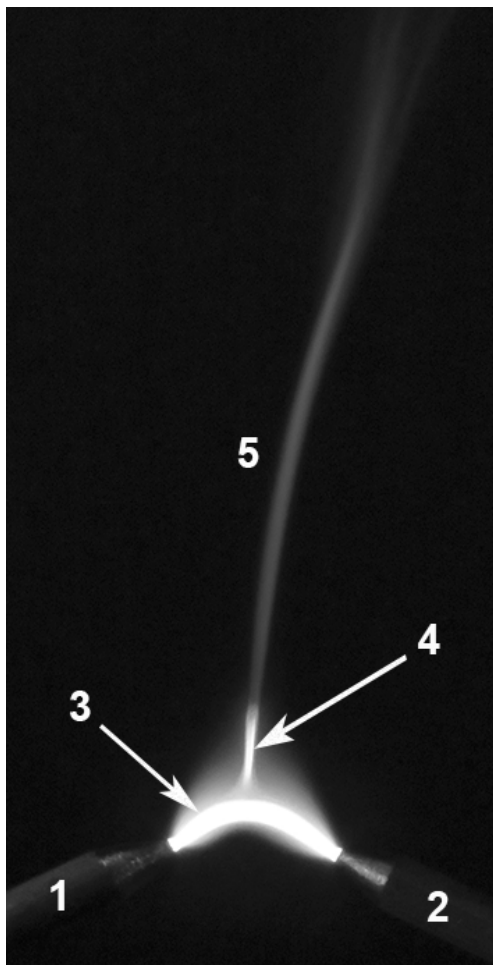


Рис. 1. Фотография плазменной струи, сформированной при атмосферном давлении и положительной полярности импульса напряжения: 1 — высоковольтный электрод; 2 — электрод, находящийся под плавающим потенциалом; 3 — токовый канал импульсно-периодического разряда; 4 — яркий «отросток» на месте изгиба токового канала; 5 — апокамп. Высота кадра 5,5 см. Экспозиция 1/8 с.

Экспериментальная установка и методики измерений

Для получения апокампа была использована установка, подробно описанная в [10]. Апокамп формировали с помощью генератора импульсов напряжения положительной полярности с частотой $f = 40\text{—}52$ кГц, длительностью импульса $\tau = 1,5$ мкс и амплитудой до 13 кВ. В этих условиях удавалось сформировать стабильный апокамп, что важно для снижения погрешности измерений.

Для определения температуры токового канала и апокампа применили несколько подходов:

Контактный метод позволял измерять величину температуры на кончике апокампа с помо-

щью платинового датчика температуры pt100, принцип работы которого основан на изменении электрического сопротивления платины от температуры. Точность датчика, по паспортным данным, в диапазоне температур, близких к 100 °С, составляет $\pm 0,35$ °С.

Измерения проводили в два этапа. На первом этапе определяли температуру по формуле

$$T_1 = \frac{R_T - 100}{A},$$

где R_T — измеренное значение сопротивления, A — постоянный коэффициент. На следующем этапе точное температурное значение определяли по формуле

$$T_1 = \frac{-((T_{n-1} \cdot 100 \cdot B \cdot A) \cdot T_{n-1} + 100) + R_T}{A} + T_{n-1}$$

где T_{n-1} — значение температуры, определенное на предыдущем этапе, B — постоянный коэффициент [11]. Коэффициенты A и B заранее известны и имеют значения $3,9692 \times 10^{-1}$ и $5,8290 \times 10^{-7}$ соответственно.

Для построения температурных профилей исследуемой системы термпарный метод дополнялся фотографическим, для чего использовали фотоаппарат Canon PowerShot SX60 HS (с частотой $\sim 1/8$ кадра/с, временем экспозиции 125 мс и чувствительностью 1600 ISO) и методику, включающую следующие шаги:

1) получение двух отдельных фотографических изображений плазмы, а также фонового изображения электродной системы в условиях, когда разряда нет;

2) приведение указанных изображений к монохромному виду, в результате чего появляется градация цвета по «интенсивности» (в нашем случае это градации серого цвета);

3) вычет фона из изображения плазменной струи, что исключает его влияние на расчет температуры слоев;

4) сканирование изображения и объединение пикселей с одинаковыми значениями в группы (т.н. «слои»), которым присваивается цвет, характеризующий их температуру.

Перечисленные операции проводили с помощью утилиты, позволяющей задавать число слоёв, на которые может быть разбито анализируемое изображение.

В результате получаем своего рода цветовую «температурную карту» явления. Предположим, что каждый слой отличается от предыдущего

на примерно одинаковое значение Δ . Тогда, зная температуру слоя T_i и температуру окружающей среды T_0 , можно рассчитать Δ по формуле:

$$\Delta = \frac{T_i - T_0}{i - 1}, \quad (1)$$

где i — номер слоя.

Тогда температуре i -го слоя соответствует выражение:

$$T_i = \Delta \times i \quad (2)$$

Соответственно, зная температуры двух слоёв, отвечающих температуре окружающей среды и температуре кончика плазменной струи, по выражениям (1) и (2) можно вычислить температуры остальных слоёв.

Для верификации этой методики измерения температуры плазменной струи были проведены тестовые исследования фотографических изображений лабораторной спиртовки (рис. 2). Предварительно проводились термопарные измерения различных участков пламени, а затем построена его температурная карта, показанная на правой части рис. 2.

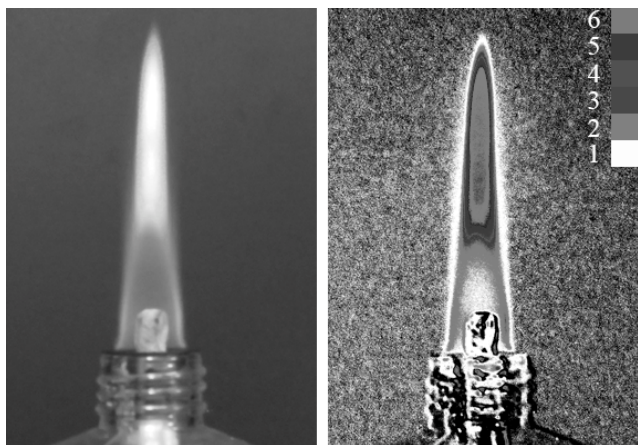


Рис. 2. Изображение спиртовки (слева) и результат его преобразования в температурную карту. Температура слоёв 2, 5, 8 равна 352, 826 и 1156 °С соответственно.

Согласно литературным данным (см., напр. [12]), спиртовка имеет минимальную температуру у основания пламени (300—350 °С) и увеличивается по приближению к «острию» второго слоя (< 1200 °С), после чего снижается на несколько сотен градусов (< 900 °С) в верхнем слое, что обусловлено полным сгоранием газов в этой части пламени. Эти данные согласуются с полученным распределением температуры.

Результаты и их обсуждение

На рис. 3 дан типичный вид свечения разряда с апокампом (справа) и обработанная версия полученного изображения (слева). Привязка к термопарным измерениям показала, что температура кончика плазменной струи составляет 109 °С. При доверительной вероятности 95 % относительная погрешность случайной ошибки в этом случае составляла 13 %. Следует отметить, что указанная величина погрешности измерений для плазменной струи была выше, чем для спиртовки, примерно в 6 раз. Это обусловлено неравновесным распределением температуры плазменной струи и сравнительной нестабильностью её положения в пространстве. Считая, что относительная погрешность применима ко всем слоям изображения, с помощью (1) и (2) получили оценку температуры 8-го слоя, соответствующего токовому каналу, которая составила 1340 ± 170 °С.

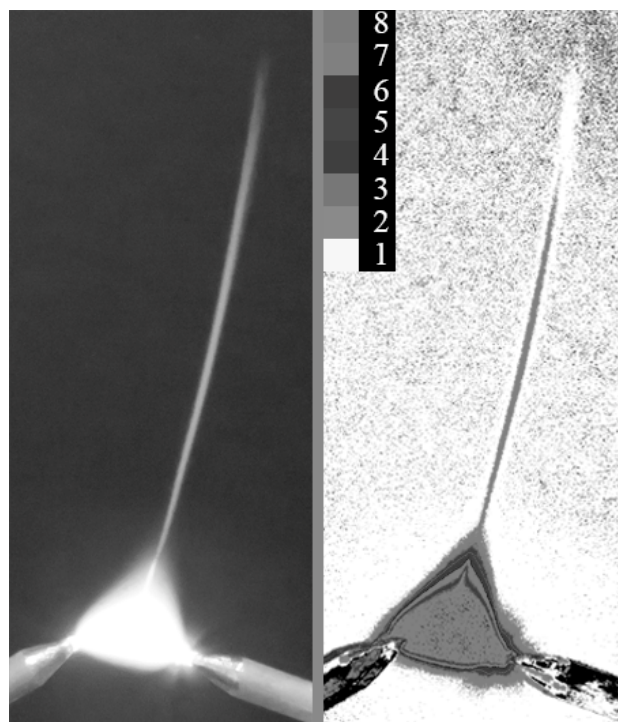


Рис. 3. Изображение разряда и апокампа (слева) и их программная интерпретация (справа).

Этот результат находится в согласии с данными работы [10], где в пространство между электродами вносилась нихромовая проволока диаметром 0,1 мм. Известно, что нихром имеет температуру плавления 1100—1300 °С. В [11] было отмечено, что конец проволоки подвергается оплавлению.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о правомерности использования методики построения «температурной карты».

Таким образом, методика построения «температурной карты» позволяет нам оперативно оценивать температуру различных участков газоразрядной системы, служащей источником апокампа. В дальнейшем её предполагается использовать для выявления особенностей температурных режимов, в которых формируется апокамп, и сравнения с другими режимами, соответствующими традиционным импульсным разрядам.

Отметим, что для измерения средней газовой температуры разряда часто применяются спектральные методы. Мы планируем использовать их в последующих исследованиях. В частности, один из спектральных методов основан на измерении относительной интенсивности вращательной структуры электронно-колебательных переходов второй положительной системы азота ($C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g$), что позволяет вычислять величины колебательной и вращательной температур в газоразрядной плазме, содержащей азот [13, 14].

Заключение

Измерены температурные параметры апокампа и пламени спиртовки с помощью термоэлектрического метода. Экспериментально показано, что плазма в апокампе имеет большой температурный градиент, меняющийся от токового канала (1340 ± 170 °C) до конца плазменной струи (110 ± 14 °C). Данные измерений согласуются с данными работы [10], где была проведена оценка газовой температуры в основном разряде по порогу плавления нихрома. Сделан вывод о достоверности предложенного метода построения «температурных карт». Полученные данные актуальны для дальнейшего построения физической модели формирования апокампа.

Авторы выражают благодарность Д. С. Печеницину за помощь в экспериментах. Исследование было выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-29-00052).

ЛИТЕРАТУРА

1. Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Вводный том. Кн. I / Под ред. В. Е. Фортова. — М.: Наука (МАИК «Наука/Интерпериодика»), 2000.
2. Райзер Ю. П. Физика газового разряда. — Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2009.
3. Paul K. Chu, XinPei Lu Low temperature plasma technology: Methods and applications. — CRC Press, 2013.
4. Lu X., Naidis G. V., Laroussi M., Reuter S., Graves D. B., Ostrikov K. // Phys. Rep. 2016. Vol. 630. No. 4. P. 1.
5. Niu Z., Shao T. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2011. Vol. 39. No. 11. P. 2322.
6. Соснин Э. А., Панарин В. А., Скакун В. С., Тарасенко В. Ф., Печеницин Д. С., Кузнецов В. С. // Журнал технической физики. 2016. Т. 86. Вып. 5. С. 151.
7. Zhang X., Liu D., Zhou R., Song Y., Sun Y., Zhang Q., Niu J., Fan H., Yang S. Z. // Appl. Phys. Lett. 2014. Vol. 104. No. 3. 043702.
8. Жданова О. С., Кузнецов В. С., Панарин В. А., Скакун В. С., Соснин Э. А., Тарасенко В. Ф. // Прикладная физика. 2016. № 2. С. 36.
9. Скакун В. С., Панарин В. А., Печеницин Д. С., Соснин Э. А., Тарасенко В. Ф. // Известия вузов. Физика. 2016. Т. 59. № 5. С. 92.
10. Соснин Э. А., Скакун В. С., Панарин В. А., Печеницин Д. С., Тарасенко В. Ф., Бахит Е. Х. // Письма в ЖЭТФ. 2016. Т. 103. № 12. С. 857.
11. Менгалиев Р. Ф., Дорогушин М. Ю. Патент РФ № 2229692. 2004.
12. Тидеман Б. Г., Сциборский Д. Б. Химия горения. Т. 3. — Л.: ОГИЗ, 1935.
13. Очкин В. Н. Спектроскопия низкотемпературной плазмы. — М.: Физматлит, 2006.
14. Britun N., Gaillard M., Kim Y. M., Kim K. S., and Han J. G. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2007. Vol. 40. P. 1022.

Temperature characteristics of apokamp-type plasma jets at the atmospheric pressure

M. V. Andreev¹, V. S. Kuznetsov^{1,2}, V. S. Skakun¹,
E. A. Sosnin^{1,2}, V. A. Panarin¹, and V. F. Tarasenko¹

¹ Institute of High Current Electronics, SB RAS
2/3 Akademicheskii av., Tomsk, 634055, Russia

² Tomsk State University
36 Lenin av., Tomsk, 634050, Russia
E-mail: badik@loi.hcei.tsc.ru

Received November 10, 2016

Experimental studies of temperature characteristics of the apokamp — a new type of the atmospheric pressure plasma jet — in air have been made. For this aim, a new procedure of "temperature maps" forming-up has been proposed and verified. It is shown that the plasma in the apokamp have a large temperature gradient with the temperature at the end of the jet about 100 °C at discharge channel temperature of about 1300 °C.

PACS: 52.50.Dg

Keywords: atmospheric pressure plasma jet, air, apokamp.

REFERENCES

1. *Encyclopedia of Low Temperature Plasma. Introduction Volume. Book I.* Ed. V. E. Fortov. (Nauka, Moscow, 2000) [in Russian].
2. Yu. P. Raizer, *Gas Discharge Physics.* (Dolgoprudny, Publishing House «Intellect», 2009) [in Russian].
3. P. K. Chu and XinPei Lu, *Low Temperature Plasma Technology: Methods and Applications.* (CRC Press, 2013).
4. X. Lu, G. V. Naidis, M. Laroussi, S. Reuter, D. B. Graves, and K. Ostrikov, *Phys. Rep.* **630** (4), 1 (2016).
5. Z. Niu and T. Shao, *IEEE Trans. Plasma Sci.* **39**, 2322 (2011).
6. E. A. Sosnin, Panarin V. A., Skakun V. S., Tarasenko V. F., Pechenitsin D. S., and V. S. Kuznetsov, *Tech. Phys.* **61**, 789 (2016).
7. X. Zhang, D. Liu, R. Zhou, Y. Song, Y. Sun, Q. Zhang, J. Niu, H. Fan, and S. Z. Yang, *Appl. Phys. Lett.* **104**, 043702. (2014).
8. O. S. Zhdanova, V. S. Kuznetsov, V. A. Panarin, V. S. Skakun, E. A. Sosnin, and V. F. Tarasenko, *Prikl. Fiz.*, No. 2, 36 (2016).
9. V. S. Skakun, V. A. Panarin, D. S. Pechenitsyn, E. A. Sosnin, and V. F. Tarasenko, *Russ. Phys. J.* **59**, 707 (2016).
10. E. A. Sosnin, V. S. Skakun, V. A. Panarin, D. S. Pechenitsin, V. F. Tarasenko, and E. Kh. Baksht, *JETF Letters* **103**, 761 (2016).
11. R. F. Mengaliev and M. Yu. Dorogushin, RF Patent No. 2229692. (2002).
12. B. G. Tideman and D. B. Sziborski, *Combustion Chemistry. V. 3.* (Leningrad, OGIZ, 1935) [in Russian].
13. V. N. Ochkin, *Spectroscopy of Low Temperature Plasma* (Wiley-VCH, 2009).
14. N. Britun, M. Gaillard, Y. M. Kim, K. S. Kim, and J. G. Han, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **40**, 1022 (2007).