

УДК 533.9.07: 537.527: 53.047

## Источник планарной плазменной струи атмосферного давления

О. С. Жданова, В. С. Кузнецов, В. А. Панарин, В. С. Скакун, Э. А. Соснин, В. Ф. Тарасенко

*В однопольном разряде с обострением напряжения и низкими расходом газа (до 1 л/мин) в щелевой геометрии разрядной зоны сформированы плоские плазменные струи атмосферного давления в воздухе, имеющие ширину до 3 см и длину до 4 см. Измерены энергетические, температурные и спектральные характеристики полученных струй. Спектр излучения содержит интенсивные максимумы, соответствующие электронно-колебательным переходам второй положительной системы молекулярного азота  $N_2$  ( $C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g$ ) и сравнительно слабые линии переходов первой положительной системы иона  $N_2^+$  ( $B^2\Sigma_u^+ \rightarrow X^2\Sigma_g^-$ ). На примере инактивации культуры *Staphylococcus aureus* (штамм ATCC 209) показано, что плазма является источником химически активных частиц, обеспечивающих инактивацию микроорганизмов.*

PACS: 52.50.Dg

*Ключевые слова:* плазменная струя, атмосферное давление, воздух, инактивация.

### Введение

Источники плазменных струй атмосферного давления (ПСАД) стали объектом широких исследований после того, как была осознана их применимость в биологии, медицине и обработке поверхностей различных материалов [1—3]. Поток плазмы в различных источниках ПСАД, как правило, формируется в разрядном промежутке (возбуждение осуществляют радиочастотным, коронным, тлеющим или барьерным разрядом), после чего выталкивается через узкий капилляр или щель за счет избыточного давления в зоне разряда, превышающего атмосферное [1—12]. Возбуждение тлеющим, коронным или барьерным разрядом

создаёт неравновесную плазму со средней температурой газа от 20 до 400 °С и плотностью заряженных частиц, типичной для слабоионизованных газов (не выше  $10^{11}$ — $10^{12}$  см<sup>-3</sup>), и концентрацией активных частиц до 100 ppm.

При температурах, близких к комнатным значениям, плазму называют холодной и нетермической (в английском варианте — cold atmospheric plasma или non-thermal plasmas) [2].

Сегодня получили широкое распространение источники ПСАД, где в роли рабочего газа выступают гелий, аргон и/или их смеси с азотом. Значительно труднее сформировать ПСАД в азоте и воздухе. В этом случае образуется больше химически активных частиц [9], но плазменный поток становится чувствительным к скорости прокачки газа и возрастает его температура. Соответственно, источник плазмы уже нельзя назвать низкотемпературным. Важно и то, что сформировать протяжённую плазменную струю не удается [12]. Свечение формируется лишь в приэлектродной зоне и быстро затухает в свободном пространстве вне её.

В работах [13, 14] нами был предложен и исследован капиллярный источник ПСАД на основе барьерного разряда, формирующий в воздухе и азоте атмосферного давления стабильные потоки длиной до 4 см. Для этого была использована конструкция, в которой на рабочем промежутке происходит существенное обострение напряжения (по сравнению с традиционными конструкциями, со-

---

Жданова Оксана Сергеевна<sup>1</sup>, ст. преподаватель.

Кузнецов Владимир Сергеевич<sup>2,3</sup>, инженер.

Панарин Виктор Семенович<sup>2</sup>, инженер.

Скакун Виктор Семенович<sup>2</sup>, старший научный сотрудник.

Соснин Эдуард Анатольевич<sup>2,3</sup>, старший научный сотрудник.

Тарасенко Виктор Федотович<sup>2</sup>, зав. лабораторией.

<sup>1</sup> Сибирский государственный медицинский университет.

Россия, 634055, Томск, просп. Академический, 2/3.

<sup>2</sup> Институт сильноточной электроники СО РАН.

Россия, 634050, Томск, Московский тракт, 2.

<sup>3</sup> Томский государственный университет.

Россия, 634050, Томск, просп. Ленина, 36.

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

Статья поступила в редакцию 19 февраля 2016 г.

держашими диэлектрический барьер и игольчатый электрод), а расход газа снижен до  $\sim 0,5$  л/мин. В этих условиях происходит лучшее заселение верхних состояний азота и уменьшается их тушение. Соответственно, формирующиеся в импульсном разряде плазменные сгустки («пули», как их принято называть в иностранной литературе) успевают пробежать большее расстояние до распада, что и обеспечивает формирование протяженного плазменного потока на выходе из сопла. О них собирательно принято говорить как о плазменной струе, хотя это не совсем корректно, поскольку она формируется дискретно, т. е. не так как в плазматронах постоянного тока [2].

Целью настоящей работы является исследование возможности перехода от капиллярной геометрии источника ПСАД барьерного разряда к планарной, что в перспективе может расширить области его применения.

### Экспериментальная установка и методики измерений

Для получения планарной плазменной струи была использована конструкция, показанная на рис. 1. Для этого в кварцевую трубку 1 от распределителя 2 подавался воздух. Трубка 1 диаметром 41 мм имела сужение 3 (с внутренним диаметром 3,7 мм), которое далее переходило в плоскую часть 4, образующую плоскую щель толщиной 0,5 и длиной 30 мм. На внешней поверхности этого элемента располагались два электрода: кольцевой высоковольтный электрод 5, и заземленный плоский электрод 6, соединенные с генератором 7. Сборка также содержала внутренний электрод, состоящий из медной фольги 8 плотно прилегающей к внутренней части трубки 1, соединенной через переходной проводник 9 (толщиной 0,5 мм) с плоским электродом 10 из нержавеющей стали толщиной  $\sim 150$  мкм. Последний, размером  $25 \times 12$  мм, имел несколько острых выступов глубиной 2 мм с шагом 2 мм. Однако и количество выступов, и их размеры варьировались в экспериментах, впрочем, как и расстояние от них до свободного пространства.

При подаче на электрод 5 импульса напряжения положительной полярности происходит перезарядка стенки трубки 1 и зарядка электрода 8. Геометрические параметры источника таковы, что разряд происходит в полости между электродом 10 и диэлектрической частью 4. В результате на выходе из щели формируется плазменный поток 11. Вдоль осей X и Y передвигали термодатчик (на рисунке не показан) или фотоприёмник.

Источник питания позволял варьировать длительность импульса напряжения  $\tau = 1-1,5$  мкс, частоту следования импульсов  $f = 10-90$  кГц и амплитуду напряжения  $U$  до 10 кВ.

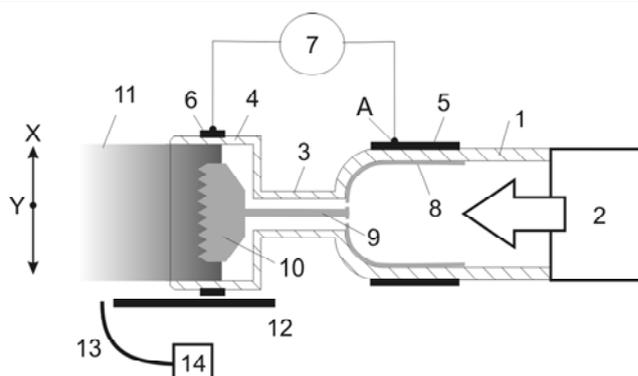


Рис. 1. Принципиальная схема установки и схема измерений: 1, 3, 4 — элементы из кварца; 2 — подача газа; 5 — высоковольтный электрод; 6 — электрод с нулевым потенциалом; 7 — генератор; 8, 9, 10 — элементы внутреннего электрода; 11 — плазма; 12 — экранирующая шторка; 13 — световод; 14 — спектрометр. По осям X и Y передвигали термодатчик (на рисунке не показан) или фотоприёмник, в точке A измерялся временной ход напряжения.

Скорость прокачки газа через систему определяли по скорости заполнения тестовых объёмов, надетых на плоскую щель источника. Величину расхода газа фиксировали в условиях, благоприятствующих истечению струи из выходной щели, и она обычно составляла  $0,95 \pm 0,1$  л/мин.

Спектр излучения плазмы на выходе измеряли из разных зон, экранированных шторкой 12, через оптоволоконно с известным спектром пропускания, сигнал с которого принимал спектрометр HR2000+ES (Ocean Optics, Inc.) на основе многоканальной ПЗС-линейки Sony IL X511B (рабочий диапазон 200–1100 нм, спектральная полуширина аппаратной функции составляет 1,33 нм).

Проводились измерения температуры плазменного потока на осях X, Y (рис. 1) с помощью платинового датчика температуры Pt100. Для этого на первом этапе определяли температуру по формуле:

$$t_1 = \frac{R_t - 100}{A}, \quad (1)$$

где  $R_t$  — измеренная величина сопротивления датчика,  $A$  — постоянный коэффициент ( $3,9692 \cdot 10^{-1}$ ), а на следующем этапе вычисляли точное значение температуры по формуле:

$$t_n = \frac{-((t_{n-1} \cdot 100 \cdot B + A) \cdot t_{n-1} + 100) + R_t}{A} + t_{n-1}, \quad (2)$$

где  $t_{n-1}$  — значение температуры, определенное на предыдущем этапе,  $B$  — постоянный коэффициент ( $5,8290 \cdot 10^{-7}$ ) [15].

Мощность излучения планарного источника ПСАД измеряли фотоприемником HAMAMATSU H8025-222, размещая его на осях

X, Y (рис. 1) пламенного потока и термически изолируя его от плазмы кварцевой пластиной (на рис. 1 она не показана).

### Результаты и обсуждение

Типичный внешний вид светящегося потока показан на рис. 2. В зависимости от приложенного напряжения свечение имеет либо гомогенный вид, либо разделяется на обособленные струи, а длина потока составляет от 0,5 до 4 см.

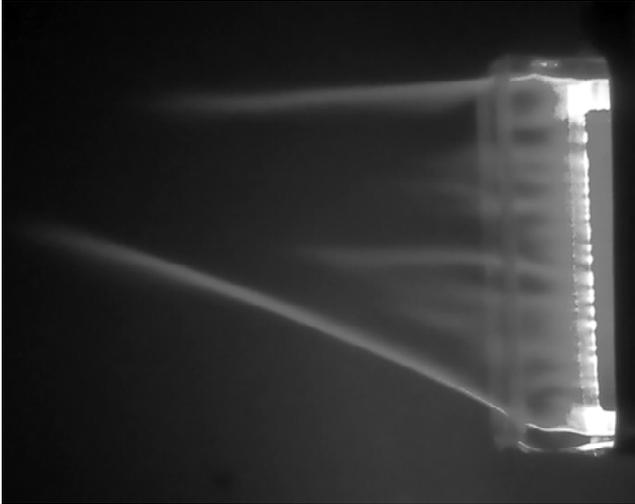


Рис. 2. Типичный вид свечения на выходе из щели: режим  $f = 90$  кГц,  $U_A = 9,2$  кВ.

Пример пространственного распределения температуры на расстоянии 5 мм от выходной щели в двух осевых направлениях X и Y дан на рис. 3. Видно, что увеличение частоты следования импульсов с 30 до 90 кГц ведёт примерно к трехкратному росту температуры плазмы, как для продольных X, так и для поперечных Y направлений сканирования термодатчиком. Несимметричность профилей температуры связана с неоднородностью потока плазмы (см. рис. 2). Эти измерения позволили нам выбрать режим для изучения инактивирующего действия планарной ПСАД на культуру *Staphylococcus aureus* (культура золотистого стафилококка), т. е. такой режим, в котором термический фактор инактивации был бы исключен.

Спектральные исследования выявили следующее: максимумы интенсивности в спектре планарной ПСАД в воздухе, а именно, в интервале  $\lambda = 280\text{--}460$  нм, соответствуют электронно-колебательным переходам второй положительной системы молекулярного азота  $N_2$  ( $C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g$ ). Кроме того, в спектре наблюдаются слабые линии, соответствующие переходам первой положительной системы иона  $N_2^+$  ( $B^2\Sigma_u^+ \rightarrow X^2\Sigma_g$ ) на длинах волн 391 и 428 нм, хорошо известные в литературе (см. ссылки в [16]).

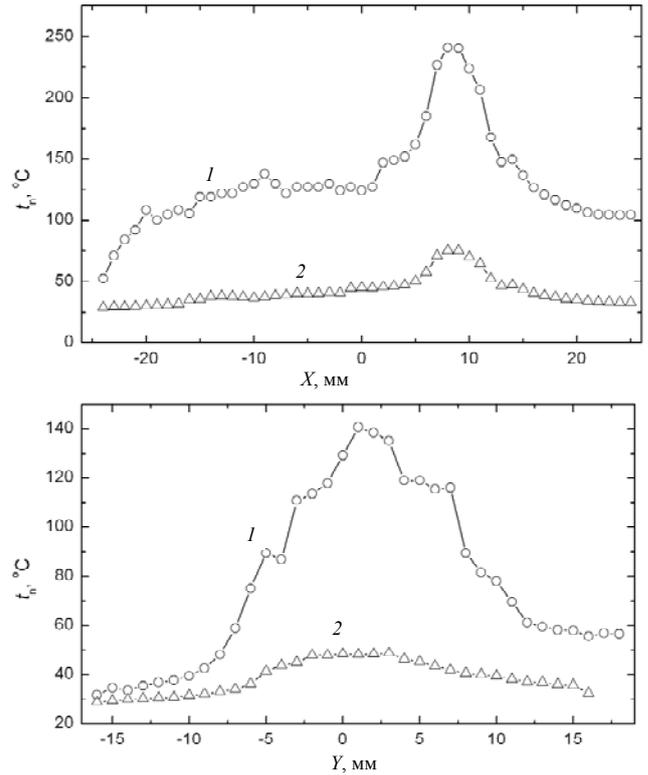


Рис. 3. Пространственное распределение температуры ПСАД в воздухе вдоль осей X и Y при  $U_A = 9,5$  кВ на различных частотах следования импульсов напряжения: 90 кГц — кривые 1, 30 кГц — кривые 2.

По совокупности своих характеристик описанная плазма была квалифицирована как потенциально способная к инактивации микроорганизмов [17]. Поэтому были проведены пилотные тесты её инактивирующего действия.

Объектом обработки была культура *Staphylococcus aureus* (штамм ATCC 209). Для этого взвесив суточных культур в концентрации  $2 \cdot 10^4$  КОЕ/мл в объеме 0,1 мл заседали на чашки Петри с питательной средой. Опытные чашки обрабатывали в воздухе различное время на расстоянии 45 мм от выходной щели. На этом расстоянии можно было исключить действие тепла (что было проверено специально) и УФ-излучения плазмы (энергетическая облученность на указанном расстоянии составляла десятки мкВт/см<sup>2</sup>). Другими словами, можно было считать, что обработка осуществляется химическими частицами, формируемыми в условиях электрического разряда в воздухе. Вероятнее всего, это окислы азота, а не озон, поскольку разогрев выходного узла (см. рис. 1) и узкая ширина щели должны приводить к быстрой рекомбинации озона. Это подтверждает исчезновение запаха озона спустя  $\sim 90$  с после включения источника плазмы, чего обычно достаточно, чтобы рабочая зона разряда разогревалась.

Обработанные чашки вместе с контрольными чашками, не подвергнутыми обработке, поме-

щали на сутки в термостат. Далее производили счёт выросших колоний и их сравнение с контролем.

В результате для времен экспозиции 15, 30 и 120 с были получены значения  $0,14 \pm 0,08 \cdot 10^3$ ;  $0,24 \pm 0,11 \cdot 10^3$ ;  $0,25 \pm 0,12 \cdot 10^3$  КОЕ соответственно. Таким образом, продемонстрировано, что вне зависимости от времени обработки концентрация жизнеспособных микроорганизмов была снижена примерно на порядок. Это подтверждает способность разработанного источника ПСАД создавать химически активные частицы.

### Заключение

Для получения планарной плазменной струи атмосферного давления предложена и апробирована конструкция источника, в которой предусмотрены элементы, приводящие к обострению напряжения на газоразрядном промежутке однобарьерного разряда. Получена планарная плазменная струя атмосферного давления шириной до 3 см и длиной до 4 см при параметрах возбуждающего импульса напряжения  $\tau = 1\text{—}1,5$  мкс,  $f = 90$  кГц,  $U_A < 10$  кВ и скоростях прокачки газа через промежутки до 1 л/мин.

Показано, что полученная плазма является источником химически активных частиц, обеспечивающих выраженный эффект инактивации (на примере культуры золотистого стафилококка).

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-29-00052).

### ЛИТЕРАТУРА

1. Lloyd G., Friedman G., Jafri S., Schultz G., Fridman A., Harding K. // Plasma Processes Polym. 2010. Vol. 7. No. 3–4. P. 194.
2. Schutze A., Jeong J. Y., Babayan S. E., Park J., Selwyn G. S., Hicks R. F. // IEEE Trans. Plasma Sci. 1998. Vol. 26. No. 6. P. 1685.
3. Kong M. G., Kroesen G., Morfill G., Nosenko T., Shimizu T., van Dijk J., Zimmermann J. L. // New Journal of Physics. 2009. Vol. 11. P. 115012.
4. Li X., Bao W., Jia P., Di C. // Journal of Applied Physics. 2014. Vol. 116. P. 023302.
5. Tang J., Li S., Zhao W., Duan Y. // Applied Physics Letters. 2012. Vol. 100. P. 253505.
6. Joh H. M., Kim S. J., Chung T. H., Leem S. H. // Appl. Phys. Lett. 2012. Vol. 101. P. 053703.
7. Sosnin E. A., Stoffels E., Erofeev M. V., Kieft I. E., Kunts S. E. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2004. Vol. 32. No. 4. P. 1544.
8. Laroussi M. // Plasma Process. Polym. 2005. Vol. 2. P. 391.
9. Daun Y., Hung C., Yu Q. S. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2005. Vol. 33. P. 328.
10. Shao T., Zhang C., Wang R., Zhou Y., Xie Q., Fang Z. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2015. Vol. 43. No. 3. P. 726.
11. Deng X. L., Nikiforov A. Yu., Vanraes P., Leys Ch. // J. Appl. Phys. 2013. Vol. 113. P. 023305.
12. Lacoste D. A., Bourdon A., Kuribara K., Urabe K., Stauss S., Terashima K. // Plasma Sources Science and Technology. 2014. Vol. 23. No. 6. P. 062006.
13. Соснин Э. А., Панарин В. А., Скакун В. С., Тарасенко В. Ф., Печеницин Д. С., Кузнецов В. С. // ЖТФ. 2015. Т. 86. № 5. С. 151.
14. Sosnin E. A., Panarin V. A., Skakun V. S., Tarasenko V. F., Pechenitsin D. S., Kuznetsov V. S. // Proc. SPIE. December 15, 2015. Vol. 9810. P. 981011.
15. Менгалиев Р. Ф., Дорогушин М. Ю. Патент RU № 2229692. 2002.
16. Mahoney J., Zhu W., Johnson V. S., Becker K. H., Lopez J. L. // Eur. Phys. J. D. 2010. Vol. 60. No. 4. P. 441.
17. Machala Z., Hensel K., Akishev Yu. (Eds.) Plasma for Bio-Decontamination, Medicine and Food Security. NATO Science for Peace and Security Series A: Chemistry and Biology. Springer Science+Business Media B.V. 2012.

## Plane atmospheric-pressure plasma jet

O. S. Zhdanova<sup>1</sup>, V. S. Kuznetsov<sup>2,3</sup>, V. A. Panarin<sup>2</sup>, V. S. Skakun<sup>2</sup>,  
E. A. Sosnin<sup>2,3</sup>, and V. F. Tarasenko<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Siberian State Medical University  
2/3 Akademicheskii av., Tomsk, 634055, Russia

<sup>2</sup> Institute of High Current Electronics, SB RAS  
2 Moskovskii trakt, Tomsk, 634050, Russia

<sup>3</sup> Tomsk State University  
36 Lenin av., 634050, Russia  
E-mail: badik@loi.hcei.tsc.ru

Received February 19, 2016

*A plane plasma jet in the atmospheric pressure air was obtained. It had a width of 3 cm and a length of 4 cm. The plane plasma jet was formed in a single-barrier discharge with voltage pulse sharpening at low gas flow (1 l/min) in the slit geometry of the discharge zone. The plasma jet energy, temperature*

**and spectral characteristics measurements were measured. It is shown that the radiation spectrum contains the intensive peaks corresponding to the vibrational transitions of the second positive system of molecular nitrogen  $N_2$  ( $C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g$ ) and the relatively weak transitions of the first positive system of the ion  $N_2^+$  ( $B^2\Sigma_u^+ \rightarrow X^2\Sigma_g^-$ ). Using culture of *Staphylococcus aureus* (strain 209 ATSS) as an example, it is obtained that formed plasma is a source of chemical active particles, which ensure inactivation of microorganisms.**

PACS: 52.50.Dg

*Keywords:* plasma jet, atmospheric pressure, air, inactivation.

## REFERENCES

1. G. Lloyd, G. Friedman, S. Jafri, G. Schultz, A. Fridman, and K. Harding, *Plasma Processes Polym.* **7** (3-4), 194 (2010).
2. A. Schutze, J. Y. Jeong, S. E. Babayan, J. Park, G. S. Selwyn, and R. F. Hicks, *IEEE Trans. Plasma Sci.* **26**, 1685 (1998).
3. M. G. Kong, G. Kroesen, G. Morfill, T. Nosenko, T. Shimizu, J. van Dijk, and J. L. Zimmermann, *New Journal of Physics* **11**, 115012 (2009).
4. X. Li, W. Bao, P. Jia, and C. Di, *Journal of Applied Physics* **116**, 023302 (2014).
5. J. Tang, S. Li, W. Zhao, and Y. Duan, *Applied Physics Letters* **100**, 253505 (2012).
6. H. M. Joh, S. J. Kim, T. H. Chung, and S. H. Leem, *Appl. Phys. Lett.* **101**, 053703 (2012).
7. E. A. Sosnin, E. Stoffels, M. V. Erofeev, I. E. Kieft, and S. E. Kunts, *IEEE Trans. Plasma Sci.* **32**, 1544 (2004).
8. M. Laroussi, *Plasma Process. Polym.* **2**, 391 (2005).
9. Y. Daun, C. Hung, Q. S. Yu, *IEEE Trans. Plasma Sci.* **33**, 328 (2005).
10. T. Shao, C. Zhang, R. Wang, Y. Zhou, Q. Xie, and Z. Fang, *IEEE Trans. Plasma Sci.* **43**, 726 (2015).
11. X. L. Deng, A. Yu. Nikiforov, P. Vanraes, and Ch. Leys, *J. Appl. Phys.* **113**, 023305 (2013).
12. D. A. Lacoste, A. Bourdon, K. Kuribara, K. Urabe, S. Stauss, and K. Terashima, *Plasma Sources Science and Technology* **23**, 062006 (2014).
13. E. A. Sosnin, V. A. Panarin, V. S. Skakun, V. F. Tarasenko, D. S. Pechenitsin, and V. S. Kuznetsov, *Tech. Phys.* **86** (5), 151 (2015).
14. E. A. Sosnin, V. A. Panarin, V. S. Skakun, V. F. Tarasenko, D. S. Pechenitsin, and V. S. Kuznetsov, *Proc. SPIE* **9810**, 981011 (2015).
15. R. F. Mengaliev and M. Yu. Dorogushin, RU Patent No. 2229692. 2002.
16. J. Mahoney, W. Zhu, V. S. Johnson, K. H. Becker, and J. L. Lopez, *Eur. Phys. J. D.* **60**, 441 (2010).
17. Z. Machala, K. Hensel, and Yu. Akishev (Eds.), *Plasma for Bio-Decontamination, Medicine and Food Security. NATO Science for Peace and Security Series A: Chemistry and Biology.* (Springer Science+Business Media B.V. 2012).