

03;04

Пространственное распределение температуры газа в воздушной плазменной струе тлеющего микроразряда постоянного тока

© О.М. Степанова^{1,2}, А.В. Казак³, А.М. Астафьев^{1,2},
М.Э. Пинчук^{1,2,¶}, Л.В. Симончик³

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

² Институт электрофизики и электроэнергетики РАН, Санкт-Петербург, Россия

³ Институт физики НАН Беларуси, Минск, Беларусь

¶ E-mail: pinchme@mail.ru

Поступило в Редакцию 15 января 2018 г.

Получено распределение температуры газа в воздушной струе атмосферного давления, источником которой является тлеющий микроразряд постоянного тока. Поле температур измерялось термопарой и сопоставлялось с теневыми изображениями. По диаметру струи выделены три характерные температурные области с хорошо выраженными границами. В центре расположена узкая горячая зона, соответствующая области видимой струи, с температурой газа от 50 до 200°C в зависимости от скорости продува и расстояния от анода. Она окружена теплой „шубой“ диаметром ~ 1 см с температурой 30–50°C. Снаружи — окружающий воздух комнатной температуры. Область с температурой более 50°C не распространялась далее 3 см от сопла разрядной ячейки.

DOI: 10.21883/PJTF.2018.18.46615.17210

Источники плазменных струй атмосферного давления являются объектом интенсивного изучения во многом благодаря перспективам их использования в биомедицинских приложениях [1–3]. Примером подобных источников являются генераторы плазменных струй на основе ВЧ- [1,3,4] и СВЧ-разряда [1,3,5], барьерного [1,3,6], тлеющего [7,8] и других типов разрядов [3].

В случае обработки живых материалов термическое действие струи на объект может быть критичным [1,9]. Температура, при которой

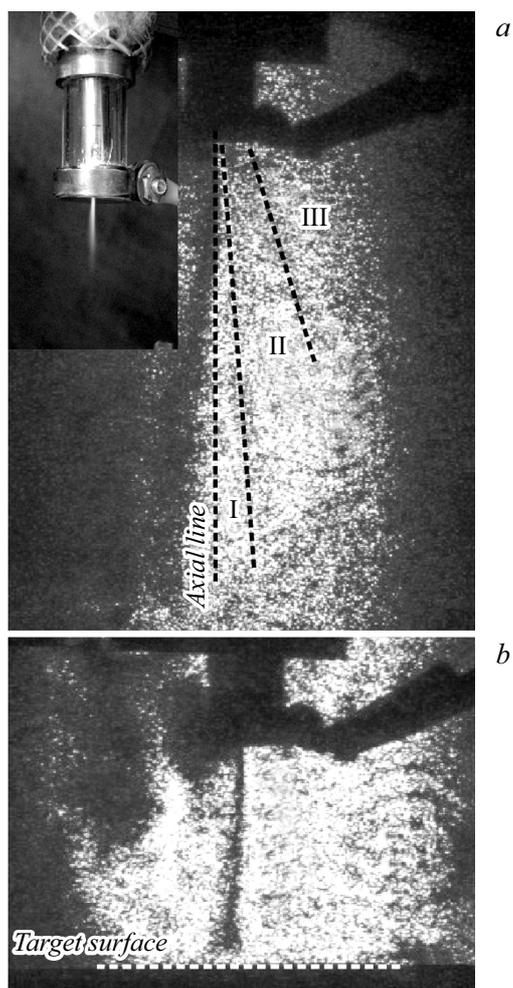


Рис. 1. *a* — вид струи и теневое изображение для свободной струи, *b* — вид струи при ее взаимодействии с преградой на расстоянии 4 см от сопла при расходе воздуха 1 л/мин. I, II, III — три характерные области на теневых изображениях (обсуждение в тексте).

начинаются необратимые изменения в ряде живых тканей, составляет величину $\sim 43^{\circ}\text{C}$ [9], и в большинстве практических терапевтических приложений температура не должна превышать 50°C [9] к концу обработки.

В настоящей работе получено распределение температуры газа в воздушной струе атмосферного давления, источником которой является тлеющий микроразряд постоянного тока [10]. Разрядная ячейка представляет собой кварцевую трубку с внутренним диаметром 0.8 см, по оси которой расположен закругленный стальной катод. Плоский стальной анод толщиной 7 мм с центральным отверстием 1.5 мм закрывает торец трубки и служит выходным соплом. Зазор между электродами равен 0.7 мм. Объемный расход воздуха варьировался в диапазоне 1–10 л/мин при помощи регулятора расхода газа Bronkhorst EL-Flow F-201AC. Использовался атмосферный воздух, сжатый компрессором. Влажность воздуха составляла 58% при температуре окружающего воздуха в лабораторной комнате 18°C . Режим тлеющего разряда устанавливался при токе 30 мА с напряжением горения $\sim 450\text{ V}$ [10]. При указанной влажности вольт-амперная характеристика (ВАХ) совпадает с ВАХ сухого воздуха [11]. При этом наблюдалась стационарная симметричная узкая светящаяся струя (рис. 1) длиной $\sim 1.5\text{ cm}$ и диаметром $\sim 1\text{ mm}$.

Поле пространственного распределения температуры свободной струи и при ее взаимодействии с преградой измерялось с помощью хромель-алюмелевой термопары К-типа. Пример температурного распределения при взаимодействии струи с преградой и профили температуры по оси струи показаны на рис. 2. Мишенью служила пластиковая чашка Петри со слоем агара толщиной 4 мм, расположенная на заземленной поверхности в 4 см от сопла разрядной ячейки. Термопара перемещалась при помощи микрометрического трехкоординатного манипулятора. Диаметр чувствительной части термопары составлял 0.2 мм. Этой величиной было ограничено пространственное разрешение при измерении температуры. При всех режимах газонапуска стационарное симметричное поле температуры устанавливалось за время не более 2 мин. Область с температурой более 50°C во всех исследованных случаях не распространялась далее 3 см от сопла разрядной ячейки.

Измеренные поля температуры сопоставлялись с теневыми изображениями [12] (рис. 1). В качестве теневой установки использовался прибор ИАБ-457 в геометрии Теплера. Лазерный диод Nichia NDB7875

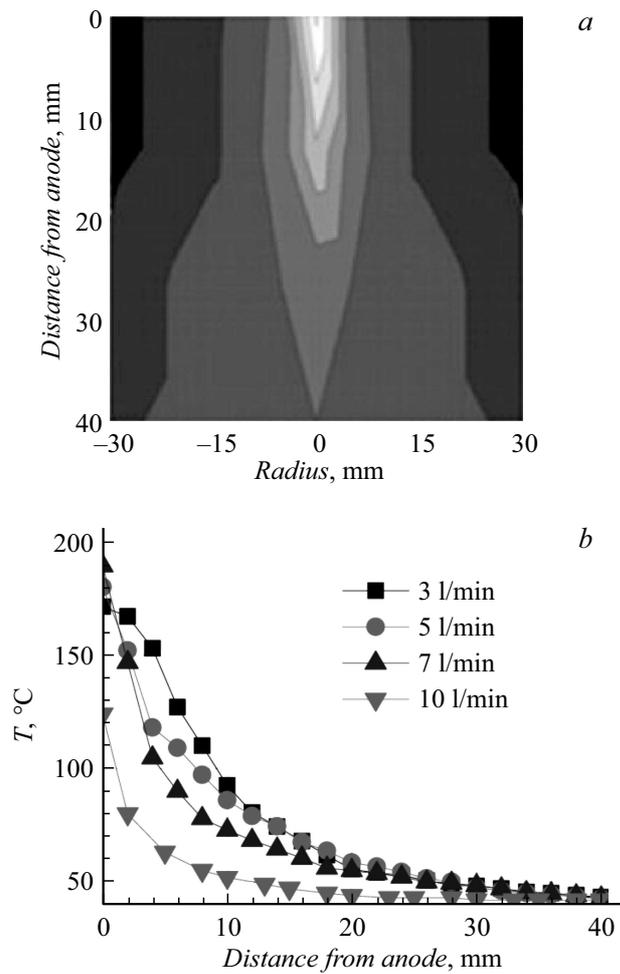


Рис. 2. Распределение температуры в струе (наиболее светлый тон изображения соответствует 200°C) для расхода воздуха 5 l/min (a) и профили температуры по оси струи при ее взаимодействии с преградой на расстоянии 4 см от сопла (b).

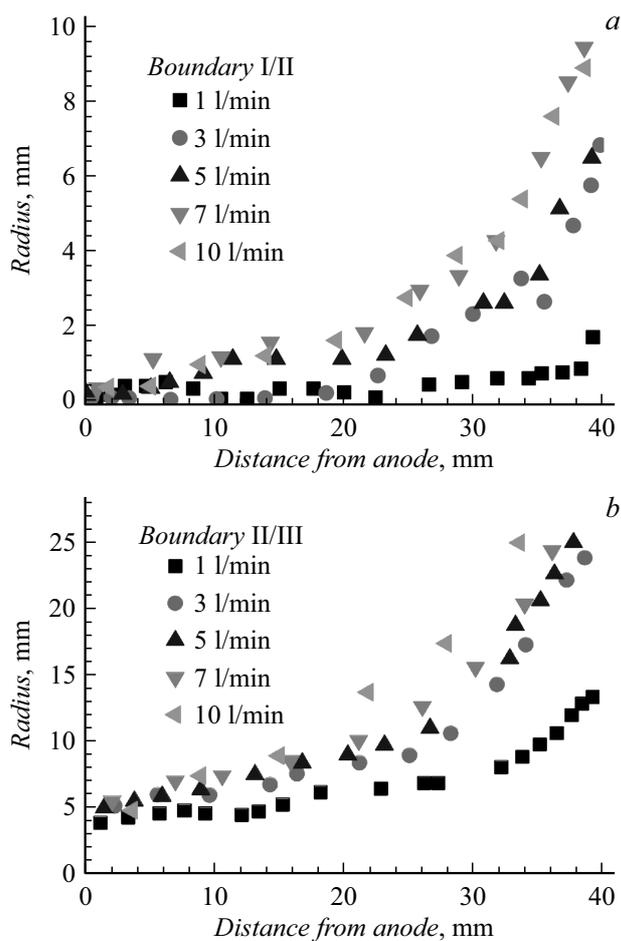


Рис. 3. Радиус характерных температурных зон в зависимости от расстояния до сопла при наличии мишени: *a* — положение границы I/II, *b* — положение границы II/III.

с длиной волны излучения 450 nm при оптической мощности до 3 W в непрерывном режиме работы был источником подсветки. Особенностью кристалла диода является форма сечения пучка в виде прямоугольника,

что позволило использовать классический нож Фуко с минимальной пространственной фильтрацией пучка лазера. Теневые картины регистрировались цифровым фотоаппаратом Nikon D90. Для селекции излучения использовался интерференционный фильтр на длине волны излучения лазера.

По диаметру струи наблюдались три характерные температурные области с хорошо выраженными границами (рис. 1). В центре — ядро струи — расположена узкая горячая зона (область I на рис. 1, *a*), соответствующая области видимой струи, с температурой газа от 50 до 200°С в зависимости от скорости продува и расстояния от анода. Она окружена теплой „шубой“ диаметром ~ 1 см с температурой 30–50°С (область II на рис. 1, *a*). Снаружи — окружающий воздух комнатной температуры (область III на рис. 1, *a*). Положение границ соответствующих зон в зависимости от расстояния до сопла при наличии мишени представлено на рис. 3. Следует заметить, что формирование переходной области II между горячим ядром струи и окружающим воздухом обусловлено технической конструкцией разрядной ячейки. В разряде рассеивается значительная мощность, и край нагретого массивного анода ограничивает поступление окружающего воздуха в ядро струи. При этом сам анод не нагревается выше 70°С благодаря охлаждению электроразрядного узла.

Результаты измерений показали, что обработку температурно-чувствительных поверхностей для исключения термического воздействия следует проводить на расстоянии не менее 3 см от выходного отверстия электроразрядной ячейки при указанных параметрах.

Работа частично поддержана грантами РФФИ № 17-58-04052 и БРФФИ Ф17РМ-050.

Список литературы

- [1] *Graves D.B.* // *Phys. Plasmas*. 2014. V. 21. N 8. P. 080901. DOI: 10.1063/1.4892534
- [2] *Lu X., Laroussi M., Puech V.* // *Plasma Sources Sci. Technol.* 2012. V. 21. N 3. P. 034005. DOI: 10.1088/0963-0252/21/3/034005
- [3] *Fridman A., Friedman G.* *Plasma medicine*. John Wiley & Sons, 2013. 545 p.
- [4] *Kolomiets R.O.* // *Plasma Med.* 2017. V. 7. N 1. P. 1–6. DOI: 10.1615/PlasmaMed.2016017358

- [5] *Chen Z., Xia G., Zou Ch., Liu X., Feng D., Li P., Hu Y., Stepanova O.M., Kudryavtsev A.A.* // J. Appl. Phys. 2017. V. 122. N 9. P. 093301. DOI: 10.1063/1.5001247
- [6] *Соснин Э.А., Панарин В.А., Скакун В.С., Тарасенко В.Ф., Печеницин Д.С., Кузнецов В.С.* // ЖТФ. 2016. Т. 86. В. 5. С. 151–154.
- [7] *Архипенко В.И., Кириллов А.А., Павлова А.В., Симончик Л.В., Дудчик Н.В., Кураица М.М., Обрадович Б.М.* // Изв. НАН Беларуси. Сер. физ.-мат. наук. 2015. № 3. С. 104–110.
- [8] *Kazak A., Kirillov A., Simonchik L., Nezhvinskaya O., Dudchik N.* // Plasma Med. 2017. V. 7. N 2. P. 109–115. DOI: 10.1615/ PlasmaMed.2017019263
- [9] *Physics of thermal therapy: fundamentals and clinical applications/ Ed. E.G. Moros.* CRC Press, Taylor & Francis Group, 2013. 375 p.
- [10] *Arkhipenko V.I., Kirillov A.A., Safronau Y.A., Simonchik L.V.* // Eur. Phys. J. D. 2010. V. 60. N 3. P. 455–463. DOI: 10.1140/epjd/e2010-00266-5
- [11] *Барышников А.С., Басаргин И.В., Бобашев С.В., Монахов Н.А., Попов П.А., Сахаров В.А., Чистякова М.В.* // Письма в ЖТФ. 2017. Т. 43. В. 22. С. 26–30.
- [12] *Astafiev A.M., Kudryavtsev A.A., Stepanova O.M., Pinchuk M.E.* // 42th IEEE Int. Conf. on plasma sciences (ICOPS-2015). IEEE, 2015. DOI: 10.1109/PLASMA.2015.7285025