

НЕКОТОРЫЕ МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ ХОЛОДНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ СТРУЙ НА ОСНОВЕ СВЧ-РАЗРЯДА АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ

© 2023 г. С. Н. Антипов^{a,*}, В. М. Чепелев^a, М. Х. Гаджиев^a,
А. Г. Абрамов^b, А. В. Угрюмов^b

^a Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

^b Акционерное общество “ТВЭЛ”, Москва, Россия

*e-mail: antipov@ihed.ras.ru

Поступила в редакцию 02.11.2022 г.

После доработки 26.12.2022 г.

Принята к публикации 26.12.2022 г.

С использованием различных методов диагностики исследовалась холодная плазменная струя атмосферного давления, представляющая собой потоковое послесвечение межэлектродного СВЧ-разряда в аргоне. Источником холодной плазмы являлась внешняя электродная плазменная горелка СВЧ-плазмотрона (2.45 ГГц) волноводного типа. Для получения пространственно-временной структуры плазменной струи применялся метод высокоскоростной тенеграфии. Периодический характер генерации плазмы исследовался с помощью измерений осциллограмм плавающего потенциала электрического зонда в струе.

Ключевые слова: СВЧ-плазмотрон, холодная плазменная струя, потоковое послесвечение, тенеграфия, электрический зонд

DOI: 10.31857/S0367292122601382, **EDN:** VDVXPH

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время активно исследуется возможность использования холодных плазменных струй атмосферного давления для плазмохимической обработки поверхности различных материалов в таких отраслях, как практическая медицина, микробиология, сельское хозяйство и пищевая промышленность [1–3]. Это связано с тем, что в таких струях генерируется неравновесная плазма и образуются возбужденные частицы и радикалы с высокой реакционной способностью. Температура потока при этом может быть снижена примерно до комнатной, что не приводит к термической деструкции материала при обработке. Такое сочетание низкой температуры и высокой реакционной способности частиц плазмы делает холодные плазменные струи технологически выгодным и эффективным инструментом в вышеупомянутых отраслях промышленности. Удобство использования плазменных струй в настоящее время очевидно, поскольку они позволяют проводить обработку объектов различных размеров и форм вне разрядной камеры.

Особое место среди источников неравновесной плазмы атмосферного давления занимают СВЧ-разряды как электродного, так и безэлек-

тродного типа. Это связано с тем, что микроволновые разряды обладают гораздо более высокой плотностью заряда и, следовательно, большей реакционной способностью, чем другие типы разрядов при том же энерговкладе. В предыдущие годы повышенное внимание уделялось разработке и исследованию источников СВЧ-плазмы различной конфигурации [4–16]. Разработке и исследованию источников СВЧ-плазмы атмосферного давления посвящены также и наши недавние работы [17–19], в которых использовалась схема плазменной горелки медицинского аппарата MicroPlaster β фирмы Adtec Plasma Technology Co. Ltd. — шесть электродов в общей разрядной камере (см., например, [15, 16]). Следует отметить, что ранее работы с аппаратом MicroPlaster β касались в основном биомедицинских приложений, и лишь немногие из них были направлены на исследования параметров генерируемой с его помощью холодной плазменной струи. В частности, в работе [15] с использованием датчиков были проведены измерения УФ-излучения и концентрации NO₂ в плазменной струе, а концентрация электронов в струе была оценена по результатам измерений с двойным электрическим зондом. В связи с малочисленностью подобных работ, большой интерес представляет разра-

ботка новых методов диагностики указанных плазменных струй.

В настоящей работе исследовалась возможность использования различных экспериментальных методов для диагностики холодной плазменной струи, представляющей собой потоковое послесвечение межэлектродного СВЧ-разряда атмосферного давления. Для визуализации плазменной струи использовалась высокоскоростная теневая съемка, а временные особенности генерации плазмы (токовый режим разряда) изучались с помощью одиночного электрического зонда.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ДИАГНОСТИКИ

В работе использовался СВЧ-плазмотрон на базе типового 1 кВт магнетрона и прямоугольного волновода (96×45 мм) с внешней электродной плазменной горелкой [17–19]. СВЧ-плазмотрон работает на частоте 2.45 ГГц, имеет СВЧ-мощность в волноводе до 3 кВт и мощность в горелке до 400 Вт. Прямоугольный волновод имеет секционную конструкцию, состоящую из трех частей. Для присоединения плазменной горелки центральная секция имеет ответвитель индукционного типа, размещенный на узкой стенке волновода. Ответвитель представляет собой петлю связи, нагруженную на коаксиальный разъем N-типа и позволяющую изменять величину отводимой мощности путем поворота плоскости петли. При максимальном значении связи (плоскость контура петли перпендикулярна широким стенкам волновода) посредством коаксиального кабеля с учетом потерь отводится примерно 10–15% мощности СВЧ-генератора. Для охлаждения магнетрона и волновода вода в контур охлаждения плазмотрона забирается из водопроводной сети.

Плазменная горелка представляет собой цилиндрическую разрядную камеру с внутренним диаметром 2.5 см с расположенными внутри нее шестью стержневыми электродами, образующими в поперечном сечении правильный шестиугольник. При прохождении газа через СВЧ-разряд за выходным отверстием горелки образуется холодная плазменная струя, представляющая собой потоковое послесвечение разряда (рис. 1). В качестве плазмообразующего газа использовался аргон высокой чистоты (99.998%), расход которого составлял 7.5 л/мин. После подачи газа в горелку и запуска магнетрона разряд в горелке инициировался (зажигался) посредством затравочной ионизации с помощью кончика тонкой проволоки, вводимого в межэлектродный промежуток. В результате пробыга газа между стержневыми электродами и внутренней стенкой разрядной камеры возникают яркие каналы, представляющие собой самостоятельные разряды тлеющего типа атмосферного давления.

Управление режимами работы магнетрона и соответственно токовыми режимами СВЧ-разряда осуществлялось с помощью блока питания. Высоковольтный блок питания СВЧ-плазмотрона — сложная радиотехническая система, состоящая из блока повышающих трансформаторов и регулируемых выпрямителей с удвоением напряжения. Блок питания использует трехфазное напряжение сети переменного тока 380/220 В, 50 Гц. Напряжение с каждой фазы поступает на отдельный повышающий трансформатор. На вторичной обмотке каждого трансформатора переменное напряжение составляет около 2.2 кВ. Регулировка мощности генерации магнетрона осуществляется переключением конденсаторов, входящих в состав выпрямителя. При этом может использоваться трехфазное подключение выпрямителя, когда задействованы все три фазы. В этом случае напряжение питания магнетрона можно считать практически постоянным, и он работает в непрерывном режиме. При питании только от одной или двух фаз напряжение питания магнетрона пульсирует с частотой 50 Гц. В этом случае магнетрон работает в импульсно-периодическом режиме.

Временные особенности генерации плазмы в струе (режимы работы магнетрона) исследовались с помощью одиночного электрического зонда (рис. 1). Для получения осциллограммы плавающего потенциала в области струи холодной плазмы использовался цифровой осциллограф Tektronix TPS 2014B с пробником Tektronix TPP0101 в качестве зонда. Игловой наконечник пробника помещался в область плазменной струи вблизи выходного отверстия горелки вдоль ее центральной оси. В зависимости от расстояния до выходного отверстия горелки уровень плавающего потенциала мог достигать нескольких вольт. Было получено, что импульсно-периодический режим при питании от двух фаз осуществлялся с частотой 50 Гц, при этом длительность импульсов (время работы магнетрона) составляла 15 мс. В непрерывном режиме амплитуда колебаний сигнала не превышала 15–20% от среднего уровня, а частота колебаний 150 Гц была обусловлена действием трех фаз напряжения питания магнетрона (рис. 2). В проведенных экспериментах мы не обнаружили заметного влияния микроволнового излучения на плавающий потенциал зонда. При перекрытии плазменной струи диэлектрической пластиной, а также при работе СВЧ-генератора без зажигания разряда, сигнал осциллографа находился на уровне шума, пренебрежимо малого по сравнению с уровнем плавающего потенциала.

Пространственно-временная структура холодной плазменной струи, истекающей в окружающий воздух, исследовалась при помощи теневых измерений. Для реализации метода оптической тенеграфии требуется источник яркого света,

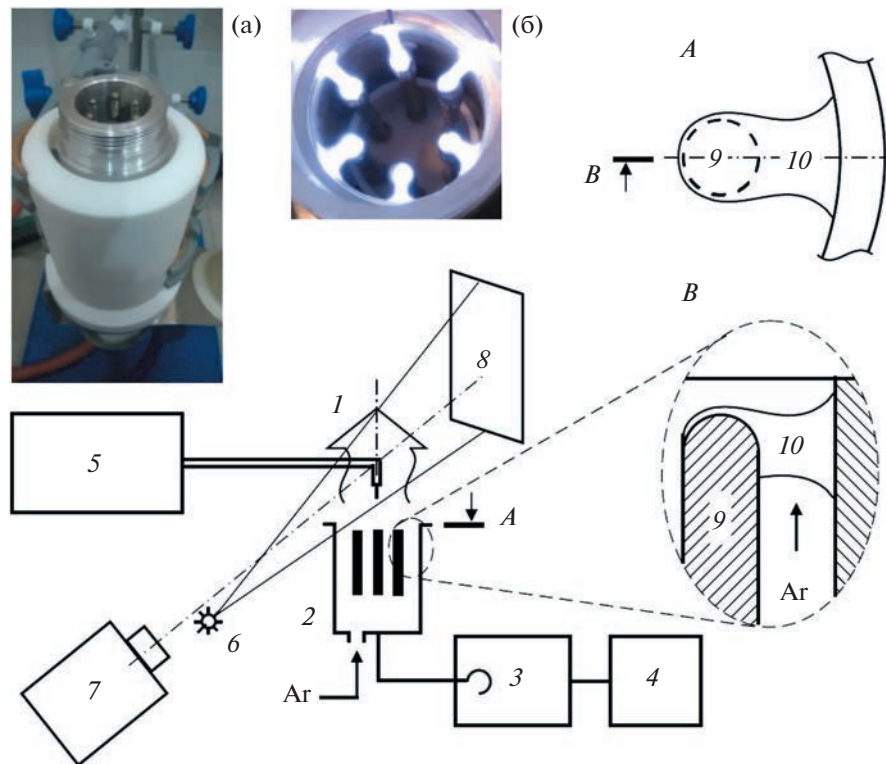


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – холодная плазменная струя, 2 – плазменная горелка, 3 – СВЧ-блок с магнетроном и волноводом, 4 – высоковольтный блок питания, 5 – осциллограф, 6 – яркий источник света (светодиодная лампа), 7 – видеокамера, 8 – проекционный экран, 9 – стержневой электрод, 10 – разрядный канал. На вставках – фотографии плазменной горелки (а) и СВЧ-разряда в ней (б).

светоотражающий экран и регистрирующая камера. Исследуемый динамический объект при этом помещается между источником света и экраном, а камера регистрирует тенеграмму, отбрасываемую объектом на экран. В нашем исследовании плазменная струя освещалась мощной светодиодной лампой, а увеличенное изображение струи проецировалось на белый экран формата А4, расположенный на расстоянии 20 см позади нее (рис. 1). Регистрация тенеграмм проводилась с помощью высокоскоростной черно-белой видеокамеры Phantom Miro M110 с частотой съемки 24 и 3000 кадров в секунду и разрешением 640×480 пикселей. Время экспозиции при этом составляло 0.7 и 0.2 мс соответственно, что позволяло получать практически мгновенные изображения струи в ходе ее развития.

Наблюдения за динамикой развития струи показывают, что на начальной стадии истечения в атмосферу движение газа соответствует ламинарному типу, а заметная турбулизация струи происходит при $t > 10$ мс (рис. 3). На начальной стадии после инициации разряда над плазменными каналами появляются одиночные сферические волны, фронт которых расширяется с начальной скоростью $\approx 10^2$ см/с (рис. 4). При $t = 10\text{--}50$ мс за выходным отверстием горелки наблюдалось об-

разование крупномасштабных вихрей размером порядка размера струи (рис. 3, 5). На более поздней стадии истечения вихри распадаются, и структура плазменной струи становится хаотичной. При этом происходит постепенное размытие

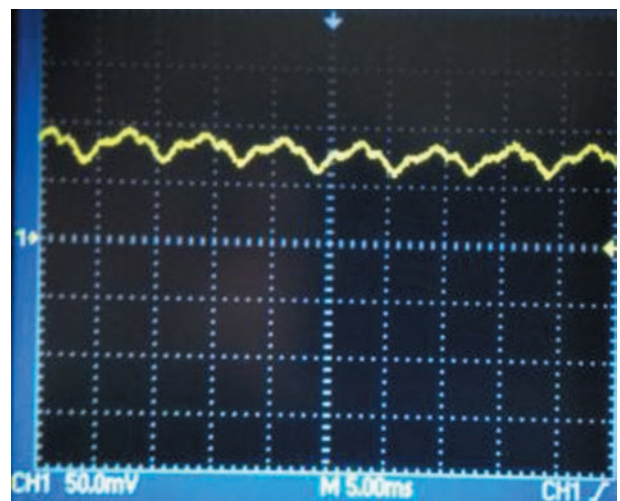


Рис. 2. Осциллограмма плавающего потенциала зонда в холодной плазменной струе в непрерывном токовом режиме разряда.

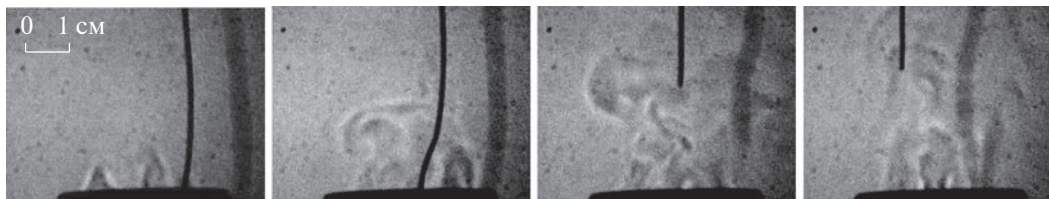


Рис. 3. Тенеграммы холодной плазменной струи (последовательность кадров видеосъемки с частотой 24 кадр/с, время экспозиции ≈ 0.7 мс).

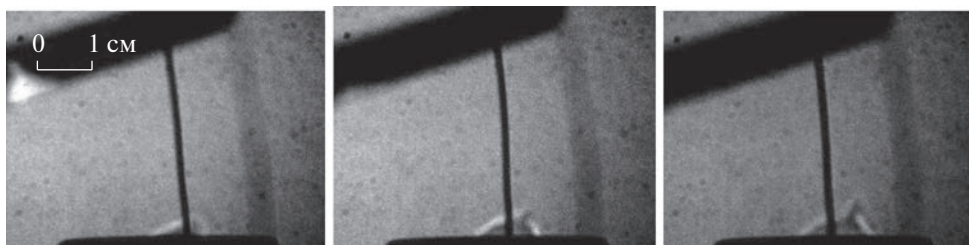


Рис. 4. Начальная фаза развития плазменной струи над одиночным разрядным каналом (последовательность кадров видеосъемки с частотой 3000 кадр/с, время экспозиции ≈ 0.2 мс).



Рис. 5. Эволюция крупномасштабной вихревой структуры в плазменной струе (последовательность кадров видеосъемки с частотой 24 кадр/с, время экспозиции ≈ 0.7 мс).

волновых фронтов и уменьшение скорости их распространения по мере удаления от выходного отверстия горелки. Процесс образования вихрей мог повторяться неоднократно. Таким образом, холодная плазменная струя подвержена характерным газодинамическим неустойчивостям, определяющим процессы перемешивания плазмы и окружающего воздуха.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментально исследовалась холодная плазменная струя, представляющая собой поточное послесвечение электродного СВЧ-разряда атмосферного давления в аргоне. Предложен метод изучения временных особенностей генерации холодной плазменной струи, а также токового режима разряда, с использованием осциллограмм плавающего потенциала электрического зонда. Методом высокоскоростной тенеграфии получе-

на визуализация пространственно-временной структуры плазменной струи, истекающей в окружающий воздух. Наблюдалось образование крупномасштабных вихрей в струе (порядка ее размера) за выходным отверстием плазменной горелки.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 21-79-30062) и средств индустриального партнера АО “ТВЭЛ” (департамент по научно-технической деятельности неядерных производств).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kang S.K., Kim H.Y., Yun G.S., Lee J.K. // Plasma Sources Sci. Technol. 2015. V. 24. P. 035020.
2. Vesel A., Primc G., Zaplotnik R., Mozetič M. // Plasma Phys. Control. Fusion. 2020. V. 62. P. 024008.
3. Fanelli F., Fracassi F. // Surface Coat. Technol. 2017. V. 322. P. 174.

4. *Shibkov V.M.* // Moscow Univ. Phys. 2019. V. 74. P. 421.
5. *Lebedev Y.A., Moiseev M.V.* // High Temp. 2000. V. 38. P. 358.
6. *Gritsinin S.I., Knyazev V.Y., Kossyi I.A., Malykh N.I., Misakyan M.A.* // Plasma Phys. Rep. 2004. V. 30. P. 255.
7. *Räuchle E.* // J. Phys. IV France. 1998. V. 8. P. Pr7-99-Pr7-108.
8. *Gritsinin S.I., Kossyi I.A., Malykh N.I., Misakyan M.A., Temchin S.M., Bark Y.B.* Preprint. Russ. Acad. Sciences. General Phys. Inst. № 1. Moscow, 1999.
9. *Shibkov V.M., Vinogradov D.A., Voskanyan A.V., Ershov A.P., Timofeev L.B., Shibkova L.V., Chernikov V.A.* // Moscow Univ. Phys. 2000. V. 55. P. 80.
10. *Shibkov V.M., Aleksandrov A.F., Ershov A.P., Timofeev I.B., Chernikov V.A., Shibkova L.V.* // Plasma Phys. Rep. 2005. V. 31. P. 795.
11. *Shibkov V.M., Dvinin S.A., Ershov A.P., Konstantinovskii R.S., Surkont O.S., Chernikov V.A., Shibkova L.V.* // Plasma Phys. Rep. 2007. V. 33. P. 72.
12. *Dvinin S.A., Shibkov V.M., Mikhnev V.V.* // Plasma Phys. Rep. 2006. V. 32. P. 601.
13. *Тихонов В.Н., Иванов И.А., Крюков А.Е., Тихонов А.В.* // Прикладная физика. 2015. № 5. С. 102.
14. *Tikhonov V.N., Aleshin S.N., Ivanov I.A., Tikhonov A.V.* // J. Phys. Conf. Ser. 2017. V. 927. P. 012067.
15. *Shimizu T., Steffes B., Pompl R., Jamitzky F., Bunk W., Ramrath K., Georgi M., Stolz W., Schmidt H.-U., Urayama T., Fujii S., Morfill G.E.* // Plasma Process. Polym. 2008. V. 5. P. 577.
16. *Herbst F., Schalkwyk J.V., and McGovern M.* Comprehensive Clinical Plasma Medicine / Eds. H.R. Metelmann, T. von Woedtke, K.D. Weltmann. Springer: Cham, 2018. P. 503.
17. *Chepelev V.M., Chistolov A.V., Khromov M.A., Antipov S.N., Gadzhiev M.Kh.* // J. Phys.: Conf. Ser. 2020. V. 1556. P. 012091.
18. *Antipov S.N., Sargsyan M.A., Gadzhiev M.Kh.* // J. Phys.: Conf. Ser. 2020. V. 1698. P. 012029.
19. *Chepelev V.M., Chistolov A.V., Antipov S.N., Gadzhiev M.Kh.* // J. Phys.: Conf. Ser. 2021. V. 2100 P. 012029.