

УДК 533.9.07

DOI: 10.21779/2542-0321-2020-35-1-71–77

**С.Н. Антипов, М.А. Саргсян, Д.И. Юсупов, М.Х. Гаджиев**

**Эмиссионные спектры аргонового электродного СВЧ-разряда атмосферного давления и холодной плазменной струи на его основе**

*Объединённый институт высоких температур РАН; Россия, 125412, г. Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2; [antipov@ihed.ras.ru](mailto:antipov@ihed.ras.ru)*

Проведены измерения и анализ спектров излучения электродного СВЧ-разряда атмосферного давления в аргоне и генерируемой холодной плазменной струи. Для проведения исследований использовалась экспериментальная установка на основе разработанного ранее многоцелевого СВЧ-плазмотрона, работающего на частоте 2.45 ГГц, с внешней портативной разрядной камерой (электродной плазменной горелкой), имеющей выходное отверстие диаметром 2.5 см и мощность 200 Вт. Внутри разрядной камеры расположены 6 стержневых электродов, образующих правильный шестиугольник в поперечном сечении. При поджиге СВЧ-разряда разрядные каналы формируются между концами электродов и внутренней стенкой камеры. При этом разряды максимально приближены к выходному отверстию горелки. В спектре излучения плазмы в разрядных каналах обнаружены молекулярные полосы NO, OH, N<sub>2</sub>, NH и атомарные линии Ag. На основе анализа спектров показано, что температура газа в канале достигает 1500 К. В спектре плазменной струи, вследствие её слабого свечения, надежно наблюдались только молекулярные полосы OH и N<sub>2</sub>. С помощью термопарных измерений показано, что температура газа в струе составляет около 100<sup>0</sup>С на расстоянии 2 см от выходного отверстия плазменной горелки. Анализ атомарных линий возбужденного аргона в эмиссионных спектрах, полученных в различных частях разрядного канала, позволил оценить электронную температуру в плазме СВЧ-разряда, которая составила от ~2000 К в центральной части канала, до ~6000 К в приэлектродных областях – вблизи стержневого электрода и стенки разрядной камеры.

Ключевые слова: *СВЧ-разряд, плазмотрон, неравновесная плазма, холодные плазменные струи, эмиссионная спектроскопия.*

**Введение**

В последние десятилетия ведутся интенсивные разработки плазмохимических методов модификации поверхности материалов, в том числе таких нетермостойких материалов, как синтетические и природные полимеры [1]. Используемая с этой целью газоразрядная плазма характеризуется низкой температурой газа, которая может быть близка к комнатной. Важнейшей особенностью неравновесной плазмы, является большой, достигающий двух порядков величины, отрыв средней энергии электронов от энергии тяжелых частиц. Следствием этого является тот факт, что эффективное образование различных активных частиц (заряженных и возбужденных частиц, свободных атомов и радикалов) приводит к чрезвычайно высокой химической активности газа, подвергнутого действию плазмы, при сравнительно низкой его температуре.

В настоящее время в России и за рубежом холодные плазменные струи на основе разрядов атмосферного давления (такие струи носят название потокового послесвечения разряда) интенсивно исследуются для применения в практической медицине, микробиологии, сельском хозяйстве и пищевой промышленности [2–14]. Тематика таких работ направлена на исследование медико-биологических аспектов плазменной обра-

ботки – процессов стерилизации и заживления, уменьшения микробного обсеменения инфицированных ран и язв, активация посадочного материала в сельском хозяйстве, стерилизации упаковочного материала. Воздействие неравновесной плазмы потокового послесвечения на поверхность имеет комплексный характер и включает следующие основные факторы: УФ-излучение, химически активные частицы, энергия заряженных частиц. Выбирая соответствующие параметры обработки, можно проводить такие технологические процессы, как плазменная очистка, плазменная активация поверхности, плазменное осаждение и плазменное травление.

Широкими возможностями характеризуется СВЧ-разряд атмосферного давления, обладающий гораздо более высокой плотностью зарядов и, как следствие, большей реакционной способностью по сравнению с другими разрядами атмосферного давления при той же мощности [2]. Теми же свойствами обладают и плазменные струи, формируемые в потоке газа за областью горения СВЧ-разряда. Несмотря на то, что технологии использования плазменных струй на основе СВЧ-разрядов постоянно развиваются и открываются новые возможности плазменного воздействия, физические свойства и методы диагностики неравновесной СВЧ-плазмы, при всей своей важности, остаются недостаточно изученными. В настоящей работе методом эмиссионной спектроскопии проведены измерения и анализ спектров излучения электродного СВЧ-разряда атмосферного давления в разрядной горелке, разработанной для медико-биологических приложений, и плазмы потокового послесвечения в области холодной плазменной струи, генерируемой в потоке аргона за выходным отверстием горелки.

### Экспериментальная установка и результаты измерений

Для проведения исследований использовалась экспериментальная установка (рис. 1) на основе многоцелевого СВЧ-плазмотрона атмосферного давления [13]. Плазмотрон состоит из СВЧ-генератора с блоком питания, волноводного тракта, согласованной оконечной водяной нагрузки, кабельной сборки с N-разъемами сопротивлением 50 Ом и внешнего портативного разрядного устройства (электродной плазменной горелки) с выходным отверстием 2.5 см. Плазмотрон работает на частоте 2.45 ГГц, имеет СВЧ-мощность в волноводе до 2.5 кВт и отбираемую мощность в горелку до 200 Вт. Плазменная горелка состоит из цилиндрической камеры, внутри которой расположены 6 стержневых электродов (рис.2), образующих правильный шестиугольник в поперечном сечении. При поджиге СВЧ-разряда разрядные каналы формируются между концами электродов и внутренней стенкой разрядной камеры. При этом разряды максимально приближены к торцу разрядной камеры (выходному отверстию горелки). В качестве плазмообразующего газа используется Ar высокой частоты (99.998 %), скорость потока которого регулируется в диапазоне от 0 до 10 литров в минуту.

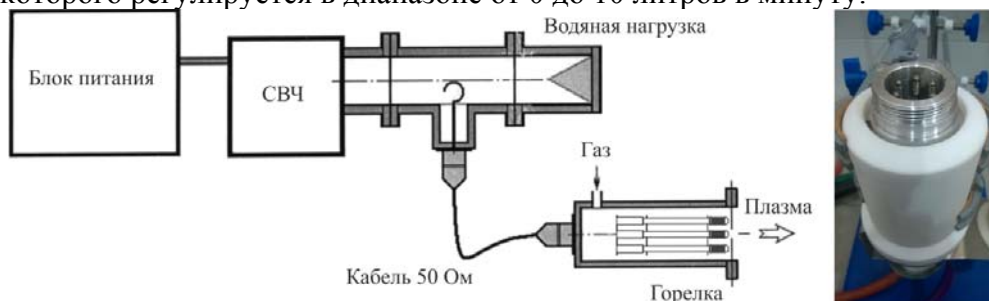


Рис. 1. Блок-схема СВЧ-плазмотрона атмосферного давления с внешней портативной электродной горелки для генерации холодных плазменных струй (справа) и вид горелки без сопла (справа)

Для проведения спектральных измерений использовался трехканальный спектрометр Avaspec 2048 с диапазоном длин волн 200÷1100 нм и спектральным разрешением 0.15 нм. Изображение исследуемого объекта формировалось кварцевой линзой на плоскости, в которой помещалось входное отверстие оптоволоконного световода, соединенного со спектрометром (рис.2), что позволяло проводить исследование спектров в выбранных зонах разрядного канала или струи.

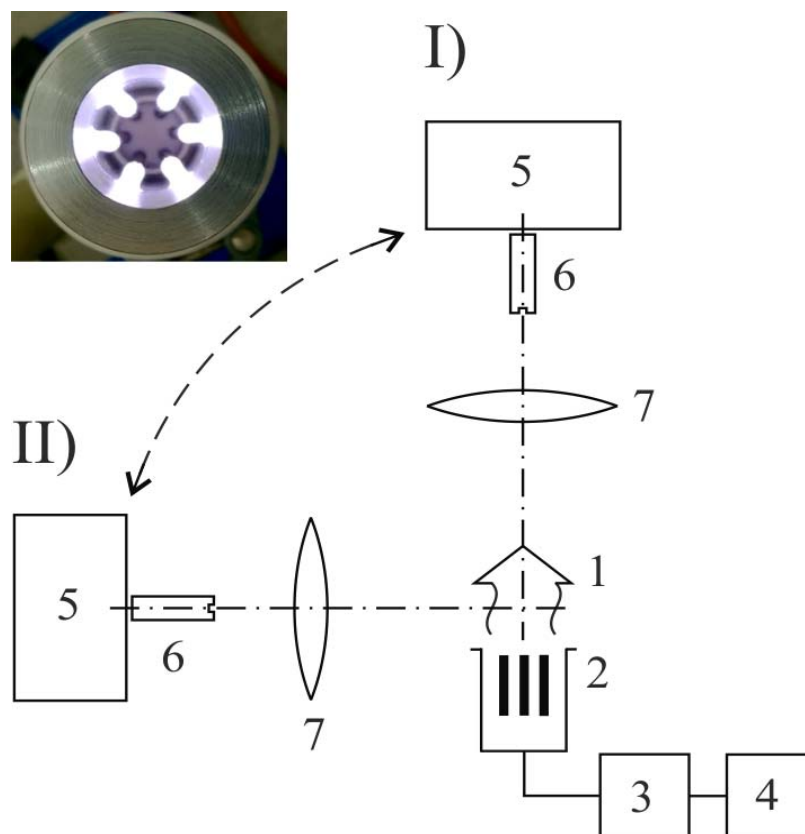
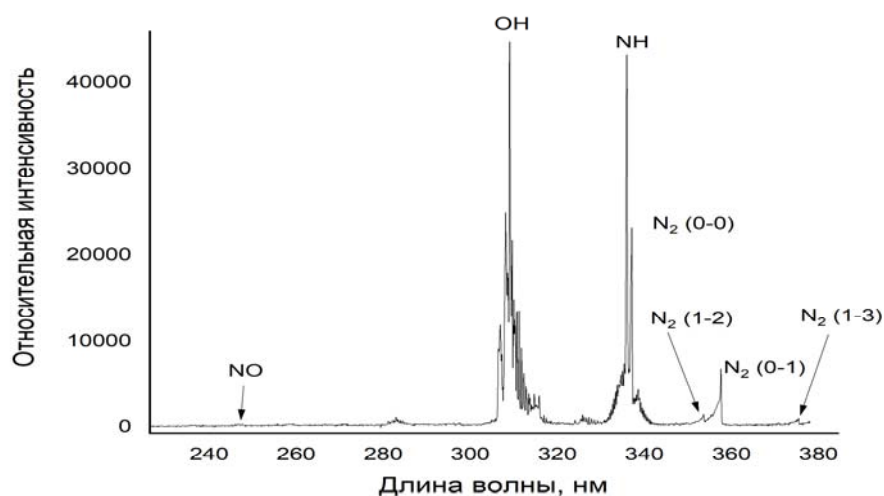


Рис. 2. Схема измерений эмиссионных спектров плазмы в разрядном канале электродной горелки II и в области холодной плазменной струи I: 1 – плазменная струя, 2 – горелка, 3 – СВЧ-блок, 4 – блок питания плазматрона, 5 – спектрометр Avaspec 2048, 6 – оптоволоконный световод, 7 – линза; на вставке показан СВЧ-разряд в горелке с прямым соплом (вид со стороны выходного отверстия, поток газа направлен на наблюдателя)

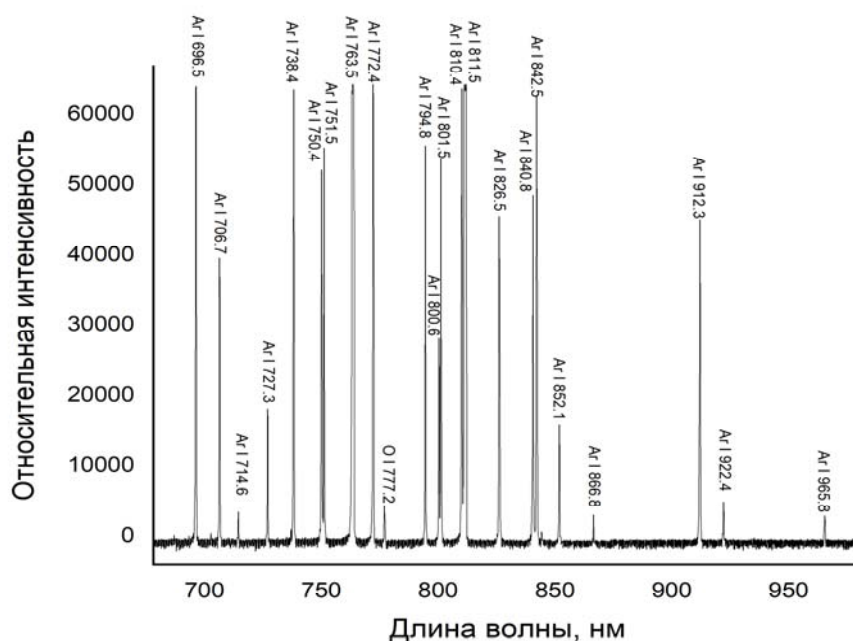
Общая картина спектрального распределения интенсивности излучения плазмы Ar в разрядном канале в открытой горелке (без сопла) при СВЧ-мощности около 100 Вт и расходе газа 2 л/мин представлена на рис. 3 (измерения по схеме I на рис. 2). Измерения проводились с выдержкой 10 мс. В спектре излучения плазмы в разрядном канале обнаружены молекулярные полосы NO, OH, N<sub>2</sub>, NH и атомарные линии Ar. При этом, концентрации OH и NH в долях концентрации азота составили соответственно  $\sim 5 \cdot 10^{-6}$  и  $\sim 10^{-6}$  вблизи электродов (стержневого электрода и стенки разрядной камеры) и  $\sim 2 \cdot 10^{-4}$  – в центральной (диффузной) зоне разрядного канала для обоих компонент. Для средней концентрации NO в разрядном канале было получено значение  $\sim 10^{-5}$  долей молекулярного азота. Наличие кислорода и азотсодержащих компонент обусловлено, по-видимому, близостью расположения разрядных каналов к выходному отверстию разрядной камеры и подмешиванием атмосферного воздуха в поток аргона в горелке.

На основе анализа молекулярных спектров определена трансляционная температура газа, которая в условиях проведения экспериментов совпадает с вращательной

температурой для двухатомных газов. Вращательная температура молекулярного азота определена путём сравнения его спектра излучения с модельным, построенным в программе Spesair. Усредненные по каналу значения полученных температур лежат в диапазоне 500÷1500 К. Анализ атомарных линий возбужденного аргона в эмиссионных спектрах, полученных в различных зонах разрядного канала, позволил оценить электронную температуру в плазме разряда, которая составила от ~2000 К в центральной канала до ~6000 К вблизи стержневого электрода и стенки разрядной камеры. Температура электронов рассчитывалась методом Больцмановской экспоненты [15] по относительному свечению спектральных линий Ar I в спектральной области 600÷1000 нм.



а)



б)

Рис. 3. Вид спектра излучения аргоновой СВЧ-плазмы в разрядном канале плазменной горелки в диапазонах длин волн а) 200–400 нм и б) 700–1000 нм

На рис. 4 представлен характерный эмиссионный спектр холодной плазменной струи в диапазоне длин волн 300÷400 нм в области за выходным отверстием горелки при расходе газа 5 л/мин (измерения по схеме II на рис. 2). Следует отметить, что плазменная струя имеет весьма слабое свечение, которое не различается невооруженным глазом. Поэтому для получения спектров струи время экспозиции было увеличено до 1 минуты. Это привело к большой зашумленности сигнала и неразличимости на уровне шума линий NO – наблюдались только молекулярные полосы OH и N<sub>2</sub>. В диапазоне длин волн 400÷1100 нм спектральных линий также обнаружено не было. Кроме того, вследствие методической погрешности, из полученных спектров не удалось измерить температуру газа в струе – программа Spesair не моделирует спектры с температурой ниже 500 К. В результате проведения термпарных измерений было показано, что температура газа в струе составляет около 100 °С на расстоянии 2 см от выходного отверстия разрядной камеры.

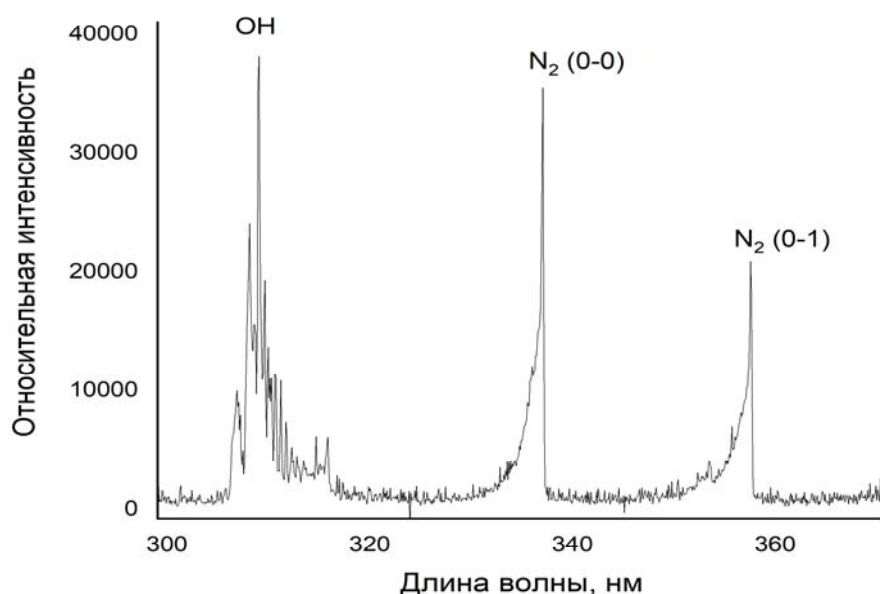


Рис. 4. Вид спектра излучения холодной плазменной струи (плазмы потокового послесвечения СВЧ-разряда) в потоке аргона вблизи выходного отверстия разрядной камеры

### Заключение

Проведены исследования электродного СВЧ-разряда атмосферного давления и генерируемой на его основе холодной плазменной струи в аргоне. СВЧ-разряд создается во внешней плазменной горелке СВЧ-плазмотрона, разработанного ранее для целей модификации нетермостойких материалов, в том числе для медико-биологических приложений. Как в разрядном канале так и в плазменной струе показано образование кислород- и азотсодержащих активных компонент с высокой реакционной способностью. При этом температура газа в разрядном канале достигает 1500 К, а в плазменной струе на расстоянии 2 см от выходного отверстия горелки составляет около 100 °С.

*Работа поддержана грантом РФФИ №18-08-01312.*

### Литература

1. Кутенов А.М., Захаров А.Г., Максимов А.И. Вакуумно-плазменное и плазменно-растворное модифицирование полимерных материалов. – М.: Наука, 2004. – 496 с.
2. Дресвин С.В. и др. ВЧ- и СВЧ-плазмотроны. – Новосибирск: Наука, 1992. – 319 с.
3. Nosenko T., Shimizu T., Morfill G. Designing plasmas for chronic wound disinfection // *New Journal of Physics*. – 2009. – V. 11, № 11. – P. 115013.
4. Kong M.G., Kroesen G., Morfill G., Nosenko T., Shimizu T., van Dijk J. et al. Plasma medicine: an introductory review // *New Journal of Physics*. – 2009. – V. 11, № 11. – P. 115012.
5. Dobrynin D., Fridman G., Friedman G. and Fridman A. Physical and biological mechanisms of direct plasma interaction with living tissue // *New J. Phys.* – 2009. – V. 11. – P. 115020.
6. Song K., Li G., Ma Y. A review on the selective apoptotic effect of nonthermal atmospheric-pressure plasma on cancer cells // *Plasma Medicine*. – 2014. – V. 4, № 1–4. – P. 193–209.
7. Прокопенко А.В., Смирнов К.Д. СВЧ-плазмотрон атмосферного давления для пищевой промышленности // *Прикладная физика*. – 2011. – № 5. – С. 64–68.
8. Levshenko M.T., Filippovich V.P., Prokopenko A.V., Smirnov K.D. Investigation of the effect of a microwave discharge plasma at asepsis packaging // *Storage and processing of farm products*. – 2011. – № 10. – С. 13–16.
9. Прокопенко А.В., Смирнов К.Д. Исследование энергетических характеристик СВЧ-плазмотрона атмосферного давления малой мощности // *Успехи прикладной физики*. – 2013. – № 6. – С. 719–723.
10. Тихонов В.Н., Иванов И.А. и др. Бюджетные генераторы для микроволновых плазмотронов // *Прикладная физика*. – 2015. – № 5. – С. 102–106.
11. Shimizu T. et al. Characterization of microwave plasma torch for decontamination // *Plasma Processes and Polymers*. – 2008. – V. 5, Issue 6. – P. 577–582.
12. Shimizu T. et al. Characterization of low-temperature microwave plasma treatment with and without UV light for disinfection // *Plasma Processes and Polymers*. – 2010. – V. 7, Issue 3–4. – P. 288–293.
13. Antipov S., Chistolov A., Chepelev V., Gadzhiev M. A portable cold microwave plasma torch: the large-area surface treatment design and probe measurements // *Proc. of the X Int. Workshop on Microwave Discharges (MD-10) / Microwave Discharges: Fundamentals and Applications*. – М.: Yanus-K, 2018. – P. 205–210.
14. Ашурбеков Н.А., Шахсинов Г.Ш., Исрапов Э.Х., Исаева З.М. Взаимодействие низкотемпературной плазменной струи атмосферного давления в смеси воздуха и аргона с биотканями // *Вестник Дагестанского государственного университета. Сер.: Естественные науки*. – 2019. – Т. 34, вып. 2. – С. 19–35.
15. Очкин В.Н. Спектроскопия низкотемпературной плазмы. – М.: Наука, 2006. – 472 с.

Поступила в редакцию 18 ноября 2019 г.

UDC 533.9.07

DOI: 10.21779/2542-0321-2020-35-1-71–77

**Emission Spectra of Atmospheric-Pressure Electrode Microwave Discharge in Argon  
And of the Cold Plasma Jet Induced by the Discharge**

***S.N. Antipov, M.A. Sargsyan, D.I. Yusupov, M.Kh. Gadzhiev***

*Joint Institute for High Temperatures RAS; Russia, 125412, Moscow, Izhorskaya st., 13,  
bld.2; [antipov@ihed.ras.ru](mailto:antipov@ihed.ras.ru)*

The measurement and analysis of the emission spectra both of atmospheric-pressure electrode microwave discharge in argon and cold plasma jet induced by the discharge are conducted. We used experimental setup based on the previously developed multipurpose 2.45-GHz-plasmatron with the external portable discharge chamber (plasma torch) with the outlet of 2.5 cm in diameter and power of 200 W. Discharge chamber has 6 rod-like electrodes which form a regular hexagon in a cross section of the torch. At discharge ignition discharge channels are formed between the ends of the electrodes and the inner wall of the chamber. In this case, the discharges are as close as possible to the torch outlet. Molecular lines of NO, OH, N<sub>2</sub>, NH and atomic lines of Ar were found in the spectrum in the discharge channel. The analysis of the spectra has shown that the translational plasma temperature in the discharge channel can reach 1500 K. In the cold plasma jet spectrum, due to its weak luminescence, only the molecular lines OH and N<sub>2</sub> were reliably observed. By means of thermocouple measurements it was obtained that temperature of the gas in the plasma jet is about 100 °C at a distance of 2 cm from the plasma torch outlet. An analysis of the atomic lines of excited argon in the emission spectra obtained in different zones of the discharge channel made it possible to estimate the electron temperature in the microwave discharge plasma, which ranged from ~2000 K in the central part of the channel, to ~6000 K in the near-electrode parts – close to rod-like electrode and the chamber wall.

**Keywords:** *microwave discharge, plasmatron, non-equilibrium plasma, cold plasma jet, emission spectroscopy.*

*Received 18 November 2019*