

## Экспериментальное исследование свойств микроволнового разряда в диэлектрической барьерной конфигурации

*В.Н. Тихонов<sup>1,\*</sup>, С.Н. Антипов<sup>2</sup>, М.Х. Гаджиев<sup>2</sup>, С.А. Горбатов<sup>1</sup>, И.А. Иванов<sup>1</sup>, А.В. Тихонов<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> ФГБНУ ВНИИ Радиологии и АгроЭкологии, Обнинск, Россия

<sup>2</sup> ФГБНУ Объединенный институт Высоких Температур РАН, Москва, Россия

\*v.n.tihonov@yandex.ru

**Аннотация.** Широкие перспективы использования нетермальной плазмы атмосферного давления (НТАП) связаны с ее огромным потенциалом уникальных технологических возможностей при создании новых продуктов и технологий. В данной статье представлены результаты экспериментального исследования параметров микроволнового источника НТАП, сочетающего в себе преимущества диэлектрического барьерного разряда и нетермальной плазменной струи.

**Ключевые слова:** нетермальная плазма, СВЧ разряд, барьерный разряд.

### 1. Введение

Уникальные свойства «холодной» плазмы НТАП позволяют использовать её для низкотемпературной плазмохимии, а также для обработки термочувствительных материалов, в том числе полимеров и биологических тканей [1]. Типичными примерами источников НТАП являются: коронный разряд, тлеющий разряд, диэлектрический барьерный разряд (ДБР) и нетермальная плазменная струя (НТПС), имеющие ограниченную эффективность активации газа [2]. Сверхвысокочастотный (СВЧ) разряд атмосферного давления снимает ограничения по удельной мощности. Однако при атмосферном давлении СВЧ плазматрон «классической» безэлектродной конструкции формирует плазменную струю с температурой от нескольких тысяч градусов и более [3]. Известные электродные СВЧ разрядники [4, 5] формируют аргоновую плазму с температурой в десятки градусов Цельсия, но такая плазма может содержать в себе продукты деструкции материала электродов.

Настоящая работа была проведена с целью исследования свойств микроволнового разряда в струе аргона, протекающего при атмосферном давлении в диэлектрической трубке, расположенной поперек волновода.

### 2. Экспериментальная установка и результаты измерений

#### 2.1. Описание экспериментальной установки

Представленный в работе [6] новый тип микроволнового источника НТАП (Рис.1) обладает как признаками диэлектрического барьерного разряда (по конфигурации и низкой температуре газа), так и способностью формирования «чистой» плазменной струи подобно классическому СВЧ плазматрону (Рис.2).

СВЧ разряд здесь возбуждается в диэлектрической трубке, проходящей поперек волновода перпендикулярно вектору напряженности электрического поля в нём. В такой конфигурации две широкие стенки волновода можно рассматривать как электродную систему из двух плоских параллельных электродов, расположенных параллельно оси разрядной трубки, стенки которой играют роль диэлектрического барьера.

Экспериментальные исследования свойств безэлектродного СВЧ разряда атмосферного давления, возбуждаемого в потоке аргона, были проведены в стеклянных и кварцевых трубках с внутренними диаметрами 5 и 6 мм. В качестве плазмообразующего газа использовался аргон ВЧ высшего сорта (99.993%).

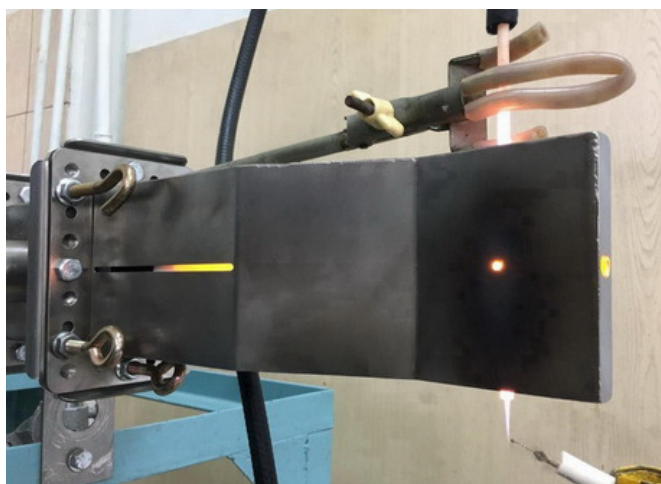


Рис.1. Микроволновый источник нетермальной плазмы.

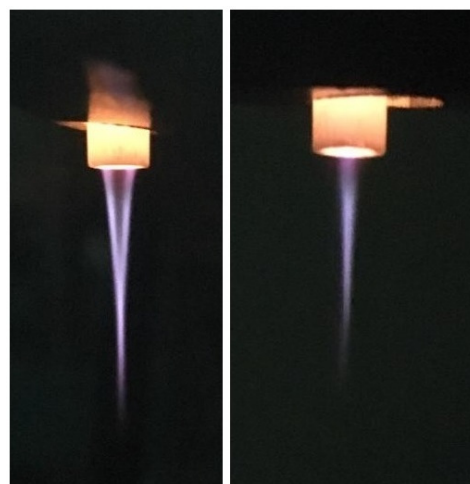


Рис.2. Струя аргоновой плазмы на выходе из керамической разрядной трубки.

### 2.2. Феноменологическое описание возбуждаемого СВЧ разряда

Динамика и структура СВЧ разряда исследовались методом скоростной видеосъемки. Излучение разряда регистрировалось камерой Phantom Miro M110 с частотой съемки до  $10^5$  кадров в секунду. Разряд внутри трубки состоит из широких однородных светящихся каналов,двигающихся по потоку газа со скоростями порядка 50–100 м/с (для расходов газа до 40 л/мин). Каналы имеют вид вертикальных диффузных разрядов-столбов, расщепляющихся в верхнем и нижнем концах на филаменты. Филаменты на концах столбов образуют древовидную структуру вблизи стенки в верхней и нижней части трубки и оканчиваются на поверхности трубки множеством ярких микропятен (Рис.3).

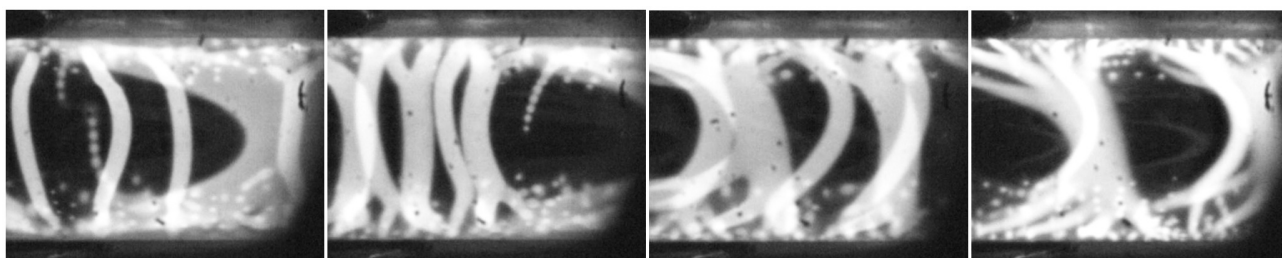


Рис.3. Типичные кадры скоростной видеосъемки в середине разрядной трубки.

За выходным отверстием волноводного концентратора плазменная струя формируется из следующих друг за другом разрядных столбов, вытягиваемых потоком газа наружу и принимающих форму удлиняющейся дуги, концы которой расположены на внутренней поверхности трубки у выходного отверстия (Рис.4). При достаточном растяжении, на расстоянии порядка  $1\div 2$  см от выходного отверстия, вытягиваемые разрядные каналы размыкаются в центральной части вследствие рекомбинации плазмы, что приводит к формированию вдоль стенок трубки нитевидных распадающихся разрядов со свободным концом, ориентированных по потоку газа.

### 2.3. Измерение температуры контактным методом

Для измерений температуры контактным методом использовалась открытая малоинерционная хромель-копелевая термопара ХК (термопара типа L в зарубежной классификации). Термопара представляет собой термоэлектроды длиной около 30 см в

диэлектрической изоляции. Такая длина необходима для удаления свободных концов от плазменной струи и позволяет поддерживать постоянство температуры свободных концов в течение всего периода измерений на уровне комнатной температуры. Температура свободных концов (холодного спая) измерялась дополнительным датчиком температуры – стандартной термопарой К-типа с помощью мультиметра. В качестве электроизмерительного прибора использовался вольтметр В7-78/1.

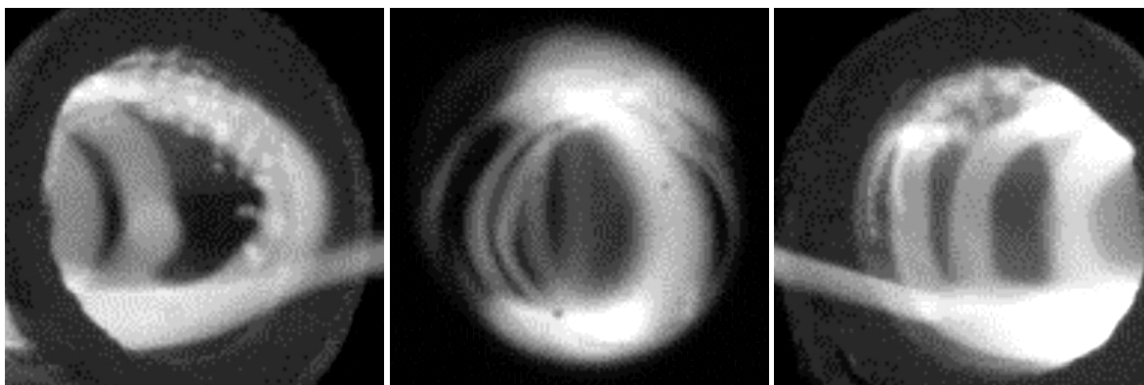


Рис.4. Разрядные каналы за выходным отверстием диэлектрической трубки, (вид со стороны торца трубки под разными углами, в центре – перпендикулярно торцу).

Для снижения наводимых электромагнитных помех, было выполнено экранирование термопары и проводов измерительного вольтметра с помощью металлической оплетки. Для сохранения малой инерционности кончик горячего спая оставался открытым. Провода вблизи горячего спая были тщательно скручены, поэтому влиянием дополнительной ЭДС вследствие воздействия частиц плазмы пренебрегалось. Измерение температуры проводилось методом компенсации температуры холодного спая с использованием значений ТЭДС для термопары L-типа для различных температур рабочего конца, приведенных в ГОСТ Р 8.585-2001. Термопара крепилась специальным держателем на позиционном столике с микрометрической подачей по оси разрядной трубки. Таким образом, рабочий спай термопары помещался в плазменную струю на заданных расстояниях от выходного отверстия трубки, которая располагалась таким образом, чтобы срез её выходного отверстия совпадал с плоскостью внешней поверхности узкой стенки волноводного концентратора. Результаты измерений приведены на Рис.5.

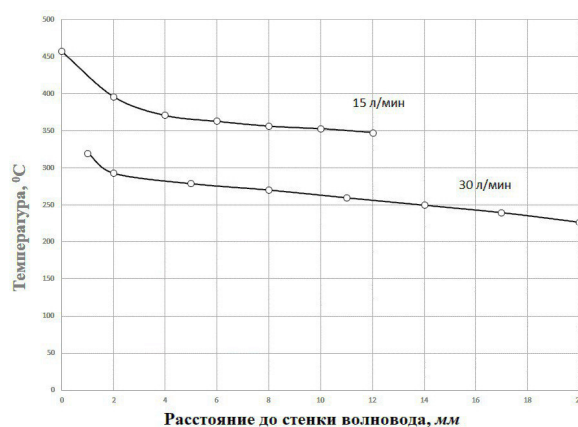


Рис.5. Распределение температуры плазменной струи по центральной оси разрядной трубки, для расхода аргона 15 и 30 л/мин, полученные с помощью ХК термопары.

#### 2.4. Оценка температуры плазменной струи оптическим методом

Оценка температуры плазменной струи оптическим методом производилась с помощью тепловизора и алюминиевой фольги. Измерения поперечного профиля температур плазменной струи проводились следующим образом. Алюминиевая фольга толщиной порядка 0.01 мкм размещалась поперек потока плазмы таким образом, что клеевой слой на ней находился с «подветренной» стороны, с этой же стороны производились измерения. Клеевой слой в данном случае использовался для предотвращения бликов, то есть внешних отражений, поскольку тепловизионные измерения с бликующих поверхностей недостоверны. Измерения проводились при мощности СВЧ генератора 600 Вт для двух значений расхода рабочего газа (аргона) – 10 и 20 л/мин, на расстоянии 20 и 30 мм от внешней стенки волновода. В качестве разрядной трубки использовалась кварцевая трубка с наружным диаметром 8 мм и толщиной стенки 1 мм. Трубка располагалась таким образом, чтобы срез её выходного отверстия совпадал с плоскостью внешней поверхности узкой стенки волновода.

При расходе аргона 10 л/мин длина видимой (светящейся) части плазменной струи составляла порядка 26 мм. Соответствующие термограммы теплового пятна в условных цветах представлены на Рис.6. Слева – на расстоянии 20 мм, справа – на 30 мм от волновода.

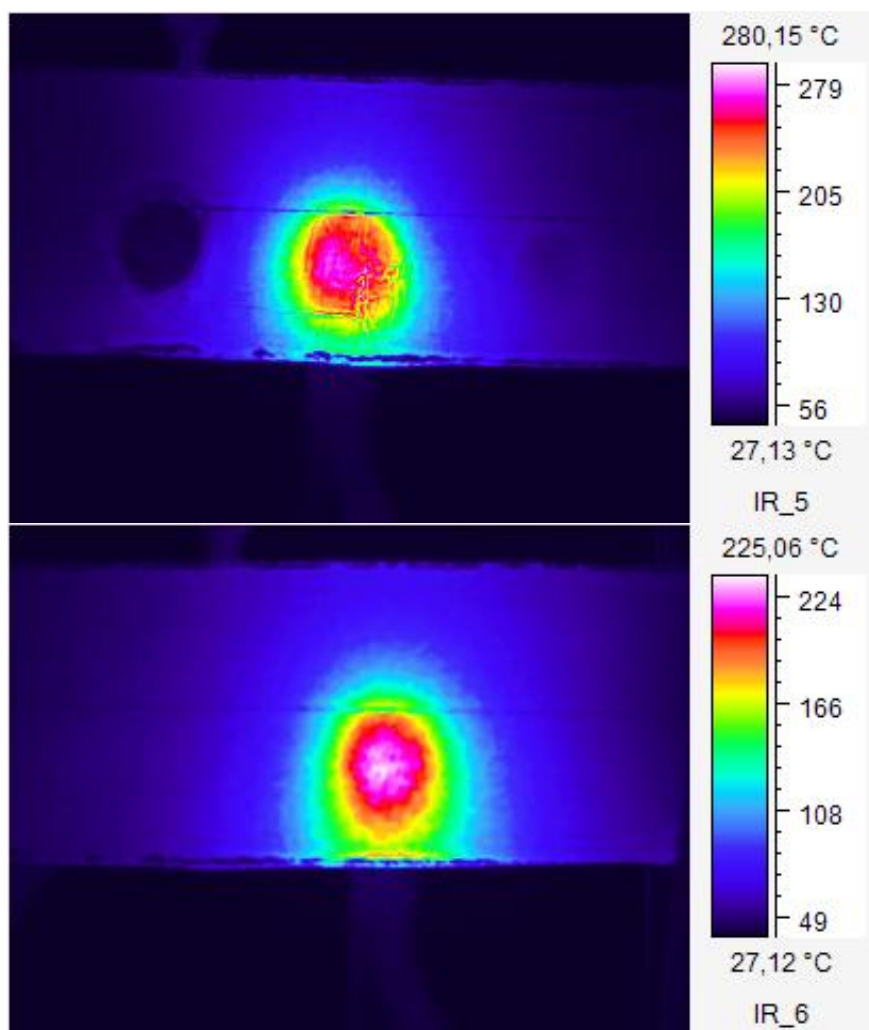


Рис.6. Тепловизионная термограмма внешней поверхности алюминиевой фольги при расходе аргона 10 л/мин., сверху – на расстоянии 20 мм, внизу – на 30 мм.

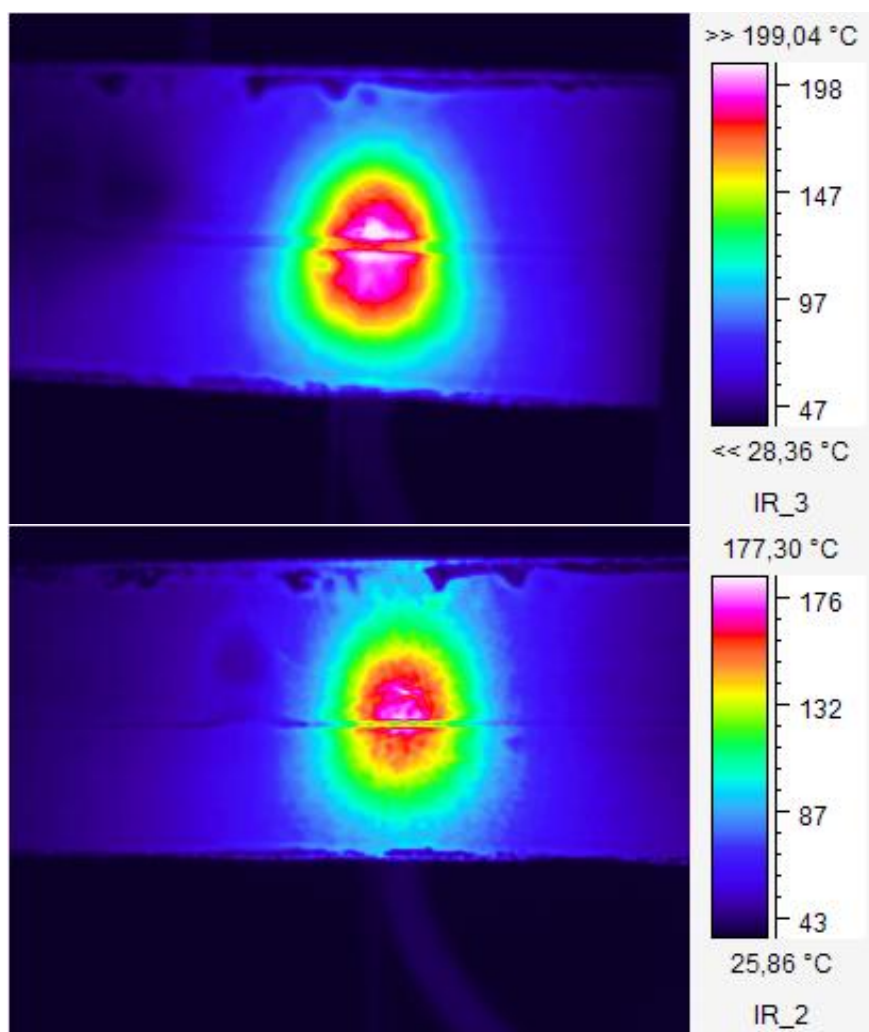


Рис.7. Тепловизионная термограмма внешней поверхности алюминиевой фольги при расходе аргона 20 л/мин., сверху – на расстоянии 20 мм, внизу – на 30 мм.

При расходе аргона 20 л/мин длина видимой (светящейся) части плазменной струи составляла порядка 21 мм. Соответствующие термограммы в условных цветах представлены на Рис.7. Слева – на расстоянии 20 мм, справа – на 30 мм от волновода.

### 2.5. Анализ эмиссионных спектров плазменной струи

Кроме того, были проведены измерения и анализ эмиссионных спектров плазменной струи, формирующейся потоком газа за выходным отверстием диэлектрической трубки. Спектральные измерения проводились с помощью трехканального спектрометра Avaspec 2048 с диапазоном длин волн 200–1100 нм и спектральным разрешением 0.15 нм. Исследовалась наиболее яркая область плазменной струи вблизи внешней стенки волновода. Изображение плазменной струи формировалось на входном отверстии оптоволоконного световода, соединенного со спектрометром. Измерения спектров проводились с выдержкой 10 мс. В спектрах излучения плазмы наблюдаются молекулярные полосы  $N_2$ , OH и атомарные линии Ag (Рис.8).

Анализ атомарных линий возбужденного аргона в эмиссионных спектрах, полученных в различных зонах разрядного канала, позволил оценить электронную температуру в плазменной струе, которая составила 0.4–0.5 эВ. Температура электронов рассчитывалась



методом Больцмановской экспоненты по относительному свечению линий Ar I в спектральной области 600–1000 нм.

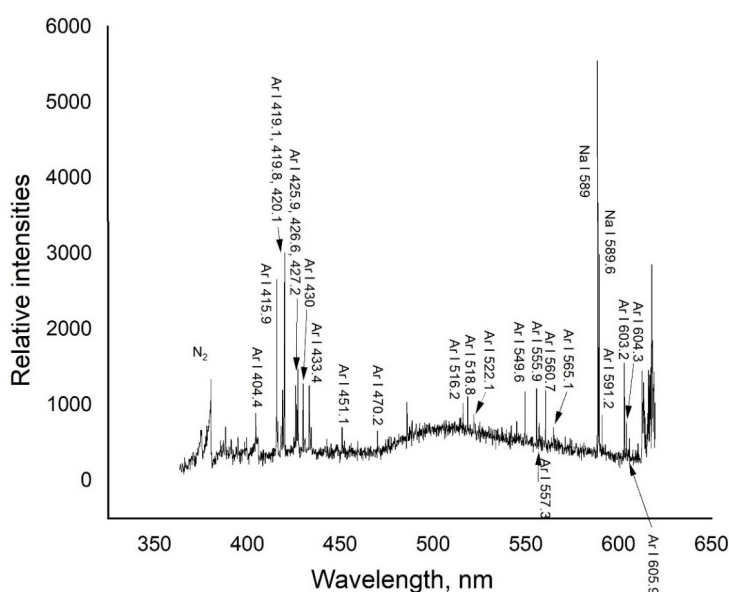


Рис.8. Типичный эмиссионный спектр излучения аргоновой плазменной струи в диапазоне длин волн 350–650 нм.

### 3. Заключение

В работе проведено экспериментальное исследование микроволнового (СВЧ) разряда атмосферного давления нового типа, возбуждаемого в диэлектрической трубке, проходящей поперек волновода перпендикулярно вектору напряженности электрического поля в нём. Методом скоростной видеосъемки исследованы структурные и динамические свойства СВЧ-разряда в потоке аргона. Проведены термпарные и тепловизионные измерения профилей температуры аргоновой плазменной струи, формируемой за выходным отверстием диэлектрической трубки, а также проведены измерения и анализ её эмиссионных спектров. В спектрах излучения плазменной струи наблюдались молекулярные полосы N<sub>2</sub>, OH, и атомарные линии Ar. Получены оценки температуры электронов в плазменной струе, которая составила около 0.5 эВ.

### Благодарности

Работа выполнялась при поддержке РФФИ (проект № 20-08-00894).

### 4. Литература

- [1] Misra N.N., Schlüter O., Cullen P.J., *Cold plasma in food and agriculture: fundamentals and applications*. (London: Academic Press, 2016)
- [2] Nehra V., Kumar A., Dwivedi H.K., *Int. J. Eng.*, **2**(1), 53, [online], 2008; <https://www.semanticscholar.org/paper/Atmospheric-Non-Thermal-Plasma-Sources-Nehra-Kumar/06453554dda2ca8e12b350956d51b63532a475cd>
- [3] Tikhonov V.N., Aleshin S.N., Ivanov I.A., Tikhonov A.V., *J. Phys. Conf. Ser.*, **927**, 012067, 2017; doi: 10.1088/1742-6596/927/1/012067
- [4] Wound Management System – Adtec SteriPlas [online]; <http://www.adtecplasma.com/>
- [5] Tikhonov V., Gorbato S., Ivanov I., Tikhonov A., *Proc. 7th Int. Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE)*, Tomsk, Russia, 596, 2020; doi: 10.1109/EFRE47760.2020.9242089