

## Газоразрядный источник соосных и разнонаправленных плазменных струй на основе барьерного разряда в радиально-сходящемся потоке

Ю. С. Акишев, А. В. Петряков, Н. И. Трушкин

*Разработан и создан оригинальный источник неравновесных низкотемпературных плазменных струй на основе барьерного разряда в радиально-сходящемся потоке атомарных и молекулярных газов при атмосферном давлении. Электродная система разряда состоит из двух параллельных кварцевых дисков, в геометрическом центре которых сделаны два соосных одинаковых отверстия. На внешнюю сторону каждого диска наклеена металлическая фольга в форме широкого кольца, соосного отверстиям. Поток газа направлен от периферии дисков к их центру и выходит наружу по нормали к поверхности дисков через узкие отверстия. В результате формируются две соосные плазменные струи, перпендикулярные дискам и направленные в разные стороны. Аналогов разработанного источника двух соосных и разнонаправленных плазменных струй в литературе нет. Источник опробован для плазменной обработки диэлектрических нитей, которые протягиваются через отверстия в барьерах и постоянно обволакиваются плазменными струями. Результаты работы показывают практическую возможность использования созданного газоразрядного источника для непрерывной «roll-to-roll» плазменной обработки полимерных нитей с целью улучшения их гидрофильности.*

*Ключевые слова:* барьерный разряд, плазменные струи, плазменная обработка, полимерные нити.

*Ссылка:* Акишев Ю. С., Петряков А. В., Трушкин Н. И. // Прикладная физика. 2020. № 4. С. 18.

*Reference:* Yu. S. Akishev, A. V. Petryakov, and N. I. Trushkin, Prikl. Fiz., No. 4, 18 (2020).

### Введение

Неравновесная низкотемпературная плазма (НТП) является источником разнообразных активных частиц (заряженные частицы, электронно- и колебательно возбужденные частицы, радикалы, УФ-излучение). По этой причине НТП давно и успешно используется в

различных приложениях [1], в частности, для обработки поверхности термически нестойких материалов с целью придания им необходимых поверхностных свойств (улучшение смачиваемости, увеличение адгезии и т. д.) [2]. Газоразрядные устройства, генерирующие НТП, условно можно разделить на два больших класса – устройства, работающие при пониженных давлениях плазмообразующего газа ( $P < 1$  Торр), и устройства, работающие при атмосферном давлении. Главное техническое преимущество устройств второго класса состоит в отсутствии в их составе дорогостоящего вакуумного оборудования, которое к тому же не позволяет осуществлять непрерывный технологический процесс.

Существует также различие и в плазмохимических процессах, которые являются доминирующими в НТП низкого и атмосферного давления. Так, при обработке материалов

---

Акишев Юрий Семенович<sup>1,2</sup>, зав. лабораторией, д.ф.-м.н., профессор.

Петряков Александр Викторович<sup>1</sup>, н.с.

Трушкин Николай Иванович<sup>1</sup>, в.н.с., д.ф.-м.н.

<sup>1</sup> АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ».

Россия, 108840, Москва, Троицк, ул. Пушкиновых, вл. 12.

E-mail: akishev@triniti.ru, trushkin@triniti.ru,

petryakov@triniti.ru

<sup>2</sup> НИЯУ МИФИ.

Россия, 115409, Москва, Каширское шоссе, 31.

Статья поступила в редакцию 08 июня 2020 г.

НТП, созданной ВЧ-разрядом низкого давления, основную роль играют положительные ионы, бомбардирующие обрабатываемую поверхность с энергией в несколько десятков эВ. Эта энергия набирается ионами в слое пространственного заряда, формируемого у обрабатываемой поверхности, контактирующей с плазмой. В случае НТП атмосферного давления основную роль в объемных и поверхностных плазмохимических процессах играют электронно- и колебательно возбужденные частицы и радикалы [3].

К настоящему времени создано большое разнообразие газоразрядных устройств, создающих НТП в атомарных и молекулярных газах при атмосферном давлении. В одних устройствах плазменная обработка ведется в зоне разряда, другие устройства создают плазменные струи, которые осуществляют дистанционную обработку материалов и объектов. В последнем случае весьма важной задачей является создание высокой концентрации электронно- и колебательно возбужденных частиц и радикалов в плазменной струе. Для решения указанной задачи нами разработан плазменный источник на основе барьерного разряда с радиально-сходящимся потоком атомарных газов, который формирует две соосные плазменные струи, направленные в разные стороны. Уникальная особенность нового плазменного источника состоит в том, что разряд, создающий активные частицы, формируется между дисковыми электродами по большой площади, определяемой эффективной площадью барьеров. В то же время, ради-

ально-сходящийся поток газа переносит все долгоживущие активные частицы к центральным выходным отверстиям, сечение которых намного меньше площади, занятой разрядом. В результате принудительной геометрической фокусировки (кумуляции) потока, концентрация активных частиц в плазменных струях, выходящих из отверстий, оказывается намного больше их средней концентрации в зоне разряда. В статье представлены результаты измерений электрических параметров нового источника плазменных струй и успешный пример его использования для улучшения смачиваемости кордовой нити, применяемой для армирования автомобильных шин.

### Описание плазменного источника

Общая схема барьерного разряда в радиально-сходящемся потоке атомарных и молекулярных газов при атмосферном давлении показана на рис. 1, а. Электродная система барьерного разряда представляет собой два параллельных кварцевых диска, в геометрическом центре которых сделаны два соосных одинаковых отверстия диаметром 2 мм каждое. На внешнюю сторону каждого диска наклеена металлическая фольга в форме широкого кольца, соосного отверстиям. Поток газа направлен от периферии дисков к их центру и выходит наружу по нормали к поверхности дисков через узкие отверстия. В результате формируются две соосные плазменные струи, перпендикулярные дискам и направленные в разные стороны.

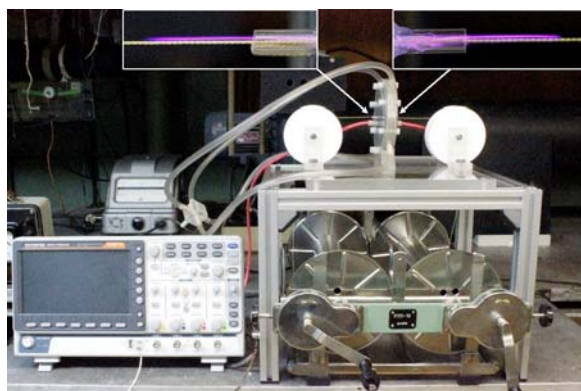
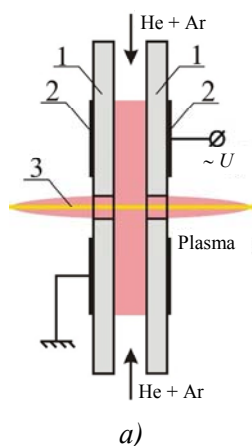


Рис. 1. а) Электрическая и конструктивная схема барьерного разряда в радиально-сходящемся потоке: 1 – кварцевые диски толщиной 5 мм ( $\epsilon = 4$ ) с отверстиями диаметром 2 мм для выхода плазменных струй; 2 – металлическая фольга – кольцо с внешним диаметром 40 мм; 3 – обрабатываемая полимерная нить толщиной 1 мм в плазменной струе. б) Изображение лабораторной установки для непрерывной «roll-to-roll» обработки кордовой нити в плазменных струях барьерного разряда в радиально-сходящемся потоке инертного газа.

Внешний вид лабораторной установки для непрерывной «roll-to-roll» обработки полимерных нитей в соосных и противоположно направленных плазменных струях показан на рис. 1, б. Обрабатываемая нить диаметром около 1 мм непрерывно протягивается через отверстия в диэлектрических барьерах так, что она постоянно обволакивается плазменными струями по всей их длине. Насколько известно авторам, аналогов разработанного источника двух соосных и разнонаправленных плазменных струй в опубликованной литературе нет.

### Электрические характеристики плазменного источника

Поначалу были проведены эксперименты по возбуждению барьерного разряда в радиально-сходящемся потоке атмосферного воздуха при частоте синусоидального напряжения питания 50 Гц и 85 кГц. Оказалось, несмотря на то, что разряд в потоке воздуха зажигался, но видимых плазменных струй в выходящих газовых струях не наблюдалось. Возможная причина связана с недостаточной

мощностью барьерного разряда, которая ограничивалась электроотрицательностью воздуха и диэлектрическими барьерами с излишне большой толщиной (5 мм). Действительно, максимальная мощность разряда в потоке воздуха составила всего  $W = 0,2$  Вт при частоте напряжения 50 Гц и амплитуде напряжения  $U = 22,4$  кВ и  $W = 0,2$  Вт при частоте напряжения 85 кГц и амплитуде напряжения  $U = 6,8$  кВ. По этой причине, основные исследования барьерного разряда были проведены в радиально-сходящихся потоках гелия и/или аргона при частоте синусоидального напряжения 85 кГц с амплитудой  $U$  до 7 кВ.

При экспериментальном исследовании электрических характеристик разработанной газоразрядной системы было обнаружено, что при фиксированной амплитуде приложенного напряжения такие параметры как ток разряда и его мощность меняются слабо при помещении диэлектрической нити в струю плазмы (см. рис. 2). Это обстоятельство дает возможность использовать барьерный разряд в радиально-сходящемся потоке для плазменной обработки непроводящих нитеобразных объектов, диаметр которых не превышает 1 мм.

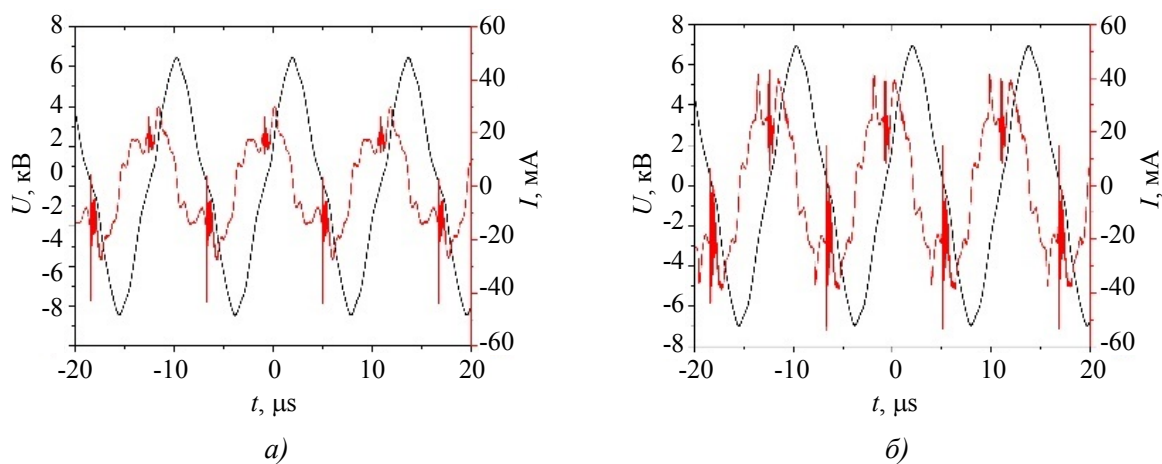


Рис. 2. Осциллограммы тока и напряжения барьерного разряда в радиально-сходящемся потоке гелия при атмосферном давлении. Скорость истечения газа из выходных отверстий в атмосферный воздух  $V = 40$  м/с: а) – осциллограммы разряда в отсутствие обрабатываемой нити, средняя мощность разряда  $W = 8,6$  Вт; б) – осциллограммы разряда при наличии обрабатываемой нити, средняя мощность разряда  $W = 10,5$  Вт.

Некоторое увеличение разрядного тока и мощности (примерно на 20 %), происходящее при наличии нити, возможно, связано с частичным запираем выходных отверстий нитью, что приводит к увеличению времени нахождения газа в зоне разряда и его допол-

нительному нагреву. Вследствие нагрева величина приведенного электрического поля  $E/N$  увеличивается, что приводит к интенсификации ионизационных процессов и, соответственно, к некоторому увеличению тока разряда и его мощности. Вообще говоря, это

положительный эффект, который совместно с увеличением времени нахождения газа в зоне разряда приводит к увеличению количества созданных разрядом активных частиц при заданной амплитуде приложенного напряжения.

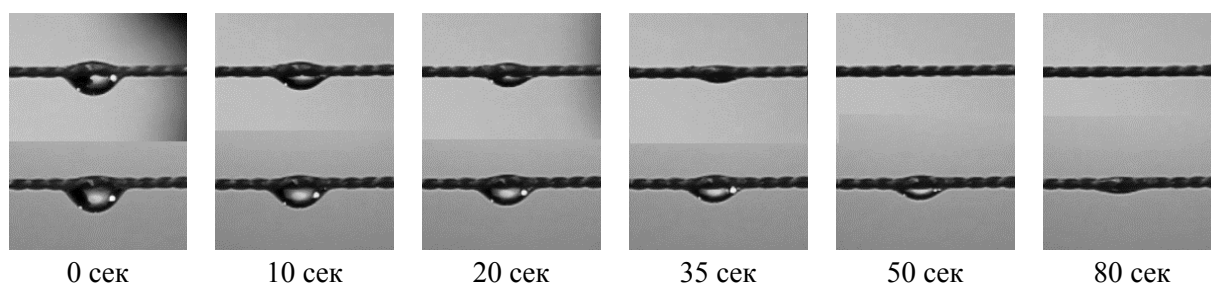
### Результаты по плазменной гидрофилизации кордовой нити

Несколько слов по поводу того, почему для проверки эффективности нового плазменного источника была выбрана полимерная нить, конкретно, кордовая нить, используемая для армирования автомобильных шин. Увеличение прочности сцепления кордовой нити с резиной автомобильной шины является одним из ключевых факторов, влияющих на итоговое качество шины. В свою очередь, адгезия нити к резине зависит от гидрофильности нити [4]. В настоящее время известно несколько плазменных методов гидрофилизации полимерных нитей, в частности, и кордовых. Один из них использует источник НТП при низком давлении, основанный на ВЧ-разряде с мощностью около 1,5 кВт [5]. Продемонстрирован положительный эффект НТП обработки, но требуемые времена НТП обработки соответствуют нескольким минутам (вплоть до 10 минут). В работе [6] проводилась НТП обработка нити в зоне плоско-параллельного барьерного разряда при атмосферном давлении. Показано, что в области частот питающего напряжения 50 Гц – 10 кГц эффект плазменной обработки практически отсутствует, но возникает в области более высоких частот. В [7] также проводилась обработка нити при атмосферном давлении, но при использовании двух струйных плазменных источников, струи которых были направлены под углом друг к другу, и в области их пересечения находилась обрабатываемая нить. При этом эффективная длина области обработки оказалась меньше длины каждой из струй. Мощность источников была высокой (около 1,5 кВт каждый) и плазменные струи были горячими, поэтому возникала проблема термического провисания нити, приводившая к неоднородности обработки. Таким образом, выполненные эксперименты по НТП обработке полимерных нитей показали перспективность плазменного метода, но одновременно обнаружили и проблемы, связанные с необходимостью уменьшать время

обработки и мощность используемых плазменных источников. С учетом сказанного выше, газоразрядный источник невысокой мощности, генерирующий одновременно две разнонаправленные и соосные плазменные струи, представляется весьма перспективным для НТП обработки полимерных нитей. Соответствующие эксперименты были проведены и полученные результаты изложены ниже.

Количественная характеристика гидрофильности объектов осуществляется разными методами, зависящими от формы и структуры объектов. Укажем на наиболее простые и доступные методы. Так, в случае плоских объектов со сплошной поверхностью для определения их смачиваемости используется гониометрия [8, 9], т. е. измеряется величина контактного угла жидкой капли с поверхностью до и после плазменной обработки. В случае волоконной или пористой структуры объекта (типа тканей и подобных им объектов) измеряется высота подъема жидкости по вертикальной ткани, нижний край которой опущен в жидкость [10]. Однако в случае нитевидного объекта эти методы неприменимы. Первый метод неприменим по геометрическим соображениям, т. к. тонкая нить является почти одномерным объектом. Второй метод неприменим потому, что малое поперечное сечение нити сильно ограничивает скорость подъема жидкости. В этом случае высота поднятия жидкости определяется не только смачиваемостью нити, но и скоростью испарения жидкости в процессе ее подъема, что сильно усложняет интерпретацию результатов.

Для оценки эффективности плазменной обработки полимерной нити по улучшению ее гидрофильности нами был разработан простой и оригинальный метод, не имеющий аналогов в литературе. Метод основан на учете того обстоятельства, что обрабатываемая кордовая нить на самом деле не сплошная, но сплетена из большого количества очень тонких волокон. Волокнистая структура формирует гигроскопичность нити. Метод состоит в том, что на горизонтально расположенную многоволоконную нить специальным шприцем дозированно наносилась очень малая капля дистиллированной воды объемом 5 микролитров. Далее фиксировалось время её полного впитывания в нить. Набор изображений, представленных на рис. 3, поясняет идею метода.



**Рис. 3.** Серия снимков, снятых с короткой экспозицией и показывающих динамику впитывания капли дистиллированной воды, нанесенной на многоволоконную полимерную нить. Под каждым снимком указано время, прошедшее с момента нанесения водной капли на нить. Снимки верхнего ряда соответствуют нити, обработанной плазмой в течение 1 минуты; снимки нижнего ряда соответствуют необработанной нити.

Проверка предложенным методом гидрофильности кордовой нити, обработанной в режиме «roll-to-roll» плазменными струями барьерного разряда в радиально-сходящемся потоке гелия показала, что реально происходит увеличение ее гидрофильности. Это проявляется в существенном (более чем в два раза) ускорении впитывания водной капли в обработанную кордовую нить. После вулканизации резины с обработанной и необработанной нитями были проведены механические испытания на прочность сцепления нитей с резиной. Оказалось, что для вырывания обработанной плазмой нити из резины требуется механическое усилие, не менее чем на 50 % превышающее усилие для необработанной нити. Таким образом, выполненные исследования доказали перспективность и высокую эффективность разработанного источника соосных плазменных струй при его использовании для плазменной гидрофилизации нитеобразных объектов в непрерывном режиме «roll-to-roll».

### Заключение

Плазменная обработка полимерных нитей при атмосферном давлении и в непрерывном режиме требует разработки специализированных газоразрядных источников. В статье описывается оригинальный источник неравновесных низкотемпературных плазменных струй, созданных барьерным разрядом в радиально-сходящемся потоке атомарных и молекулярных газов при атмосферном давлении. Поток газа направлен от периферии парал-

лельных и соосных друг другу дисковых барьерных электродов к их центру. Далее он выходит наружу по нормали к поверхности барьеров через узкие отверстия, формируя одновременно две соосные и разнонаправленные плазменные струи. Аналогов разработанного источника плазменных струй в литературе нет. Маломощный двухструйный источник был испытан при обработке плазменными струями кордовой нити, используемой для армирования автомобильных шин. В процессе НТП обработки нить протягивается через отверстия в диэлектрических барьерах и постоянно обволакивается струями неравновесной плазмы. Наличие двух струй увеличивает время контакта обрабатываемой нити с активной плазмой. Результаты работы показывают перспективность и практическую возможность использования созданного газоразрядного источника для непрерывной «roll-to-roll» плазменной обработки диэлектрических полимерных нитей с целью улучшения их гидрофильности и адгезионных свойств.

Работа выполнена при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (грант № 19-52-04007 Бел\_мол\_а).

### ЛИТЕРАТУРА

1. Kogelschatz U. // Plasma Chem. Plasma Processing. 2003. Vol. 23. P. 1.
2. Гильман А. Б., Потапов В. К. // Прикладная физика. 1995. № 3–4. С. 14.
3. Akishev Yu., Aponin G., Petryakov A., Trushkin N. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2018. Vol. 51. P. 274006.

4. Plasma Surface Modification of Polymers. Relevance to Adhesion. – Eds. Strobel M., Lyons C. S., Mittal K. L. The Netherlands: VSP BV, 1984.
5. Сергеева Е. А., Ибатуллина А. Р. // Вестник Казанского технологического университета. 2012. № 4. С. 63.
6. Janca J., Stahel P., Buchta J., Subedi D., Krma F., Pryckova J. // Plasmas and Polymers. 2001. Vol. 6. № 1–2. P. 15.
7. Dierkes W., Louis A., Noordermeer J., Blume A. // Polymers. 2019. Vol. 11. P. 577.
8. Kaelble D. H. Physical Chemistry of Adhesion. – New York: Wiley, 1971.
9. Wu S. Polymer Interfaces and Adhesion. – New York: Marcel Dekker, 1982.
10. Morent R., De Geyter N., Verschuren J., De Clerck K., Kiekens P., Leys C. // Surface & Coatings Technology. 2008. Vol. 202. P. 3427.

PACS: 52.80.–s

## Gas-discharge source of coaxial and opposite directed plasma jets based on a barrier discharge in radially converging gas flow

Yu. S. Akishev<sup>1,2</sup>, A. V. Petryakov<sup>1</sup>, and N. I. Trushkin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> SRC RF TRINITI

vl. 12 Pushkovykh st., Moscow, Troitsk, 108840, Russia

<sup>2</sup> NRNU MEPhi

31 Kashirskoe shosse, Moscow, 115409, Russia

*Received June 08, 2020*

*An original source of non-equilibrium low-temperature plasma jets based on a barrier discharge in radially converging flow of atomic and molecular gases at atmospheric pressure was developed and created. The electrode discharge system consists of two parallel quartz disks, in the geometric center of which are made two coaxial identical holes. A metal foil in the form of a wide ring aligned with the holes is glued to the outside of each disk. The gas flow is directed from the periphery of the disks to their center and goes out normal to the surface of the disks through narrow openings. As a result, two coaxial plasma jets are formed, perpendicular to the disks and directed in different directions. In the published literature there are no analogues of the developed source of two coaxial and opposite directed plasma jets. The source was tested for plasma treatment of dielectric yarns, which were pulled through holes in barriers and were constantly enveloped by non-thermal plasma jets. The results of the work show the practical possibility of using the created gas-discharge source for continuous “roll-to-roll” plasma treatment of polymer filaments in order to improve their hydrophilicity.*

*Keywords:* barrier discharge, non-thermal plasma jet, plasma treatment, polymer yarns.

### REFERENCES

1. U. Kogelschatz, Plasma Chem. Plasma Processing **23**, 1 (2003).
2. A. B. Gilman and V. K. Potapov, Prikl. Fiz., No. 3–4, 14 (1995).
3. Yu. Akishev, G. Aponin, A. Petryakov, and N. Trushkin, J. Phys. D: Appl. Phys. **51**, 274006 (2018).
4. Plasma Surface Modification of Polymers. Relevance to Adhesion. Eds. M. Strobel, C. S. Lyons, K. L. Mittal (The Netherlands, VSP BV, 1984).
5. E. A. Sergeeva and A. R. Ibatyullina, Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta, No. 4, 63 (2012).
6. J. Janca, P. Stahel, J. Buchta, D. Subedi, F. Krma, and J. Pryckova, Plasmas and Polymers **6** (1–2), 15 (2001).
7. W. Dierkes, A. Louis, J. Noordermeer, A. Blume, Polymers **11**, 577 (2019).
8. D. H. Kaelble, *Physical Chemistry of Adhesion* (Wiley, New York, 1971).
9. S. Wu, *Polymer Interfaces and Adhesion* (Marcel Dekker, New York, 1982).
10. R. Morent, N. De Geyter, J. Verschuren, K. De Clerck, P. Kiekens, and C. Leys, Surface & Coatings Technology **202**, 3427 (2008).