

УДК : 533.9.08+621.039.6

А.С. Пазыл, А.К. Акильдинова, Т.Т. Данияров, Е.А. Үсенов, М.К. Досболаев,
Т.С. Рамазанов, М.Т. Габдуллин

КазНУ им. аль-Фараби, ННЛОТ, аль-Фараби, 71, 050040, Алматы

НИЗКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ПЛАЗМА СТРУЙНОГО ТИПА ПРИ АТМОСФЕРНОМ ДАВЛЕНИИ

Аннотация. В данной работе представлены результаты исследования структуры, электрических свойств и температуры плазмы струйного типа при атмосферном давлении в среде инертных газов, таких как гелий и аргон. Были получены результаты измерения длины и формы плазменной струи при разных объемных расходах газа и разных значениях высоковольтного напряжения на электродах разряда и проведен сравнительный анализ. Показано, что плазменные струи при атмосферном давлении, полученные на основе диэлектрического барьерного разряда, имеют относительно низкую температуру и могут быть применены для обработки живых клеток и термочувствительных материалов.

Ключевые слова: низкотемпературная плазма при атмосферном давлении, диэлектрический барьерный разряд, плазменная струя, температура плазмы.

Введение

Низкотемпературные плазменные струи (Atmospheric Pressure Plasma Jet) ионизируются локальными потоками газа (инертные газы), генерируемыми при нормальном давлении с помощью микроволн высокой частоты или импульсных постоянных токов в плазменных реакторах. Активные формы кислорода образуются из примеси химически активных газов (O_2 , N_2 и другие), которые способны реагировать с биологическими материалами или тканями [1]. Низкотемпературные плазменные струи оказались очень полезным открытием для биомедицинского применения [2-6]. Одним из главных преимуществ этих источников плазмы является тот факт, что они могут генерировать стабильную и управляемую тонкую струю плазмы в окружающую среду. Кроме того, такая плазма не вызывает повреждений в обработанном материале (живые клетки или термочувствительные материалы), так как она электрически безопасна и распространяется от области высокого напряжения в область с отсутствием приложенного внешнего электрического поля и на выходе струя имеет комнатную температуру [7]. Эти свойства дают преимущества развитию плазменной медицины - нового направления в науке на стыке физики и химии плазмы с биологией и медициной, в частно-

сти, при использовании устройств с плазменной струей в целях обеззараживания и обработке биологических клеток или тканей. Обработка живых тканей плазменной струей оказывает терапевтический эффект при стерилизации и заживлении ран, при лечении ряда кожных заболеваний, остановке кровотечения и т.д.

При исследовании диэлектрического барьерного разряда ионизированный квазинейтральный газ назвали «plasma jet» - плазменная струя. Совсем недавно, было показано, что плазменные струи на самом деле не являются непрерывным объемом плазмы, они состоят из мелких плазменных групп, распространяющихся с очень высокими скоростями. Эти плазменные группы стали известны как "плазменные пули" и были обнаружены независимо друг от друга, примерно в одно время разными группами авторов [8-9]. Впоследствии, во многих научных группах начались экспериментальные и теоретические исследования этого явления, для того, чтобы понять, как эти "плазменные пули" генерируются, и почему они двигаются при таких высоких скоростях. В работе [9], чтобы объяснить экспериментальные наблюдения, Лу и Ларусси предложили модель фотоионизации. Однако, дальнейшие исследования показали, что высокое электрическое

поле, генерируемое в головной части «плазменной пули» (из-за разделения зарядов) играет решающую роль в образовании и распространении механизмов плазменных пуль. На сегодняшний день существует общее мнение о том, что плазменные пули фактически являются результатом ионизации волн, распространяющихся при высоких скоростях вдоль газового канала, выходящего из сопла устройства. Это очень похоже на распространение стримеров [4]. В отличие от обычных стримеров, которые, как правило, происходят в случайные моменты времени и разветвляются по непредсказуемым направлениям, плазменные пули являются повторяющимися и распространяются только вдоль оси устройства, на котором присутствует четко определенный канал рабочего газа. Этот эффект может помочь для пространственной и временной управляемости плазменными струями. Еще один интересный вывод был впервые описан в работе [10] и позже подтвержден другими исследовательскими группами. Авторами работ [11-12] утверждается, что плазменные пули покидают сопло устройства полой формы (в форме кольца). Это наблюдалось при помощи фотографирования фронтальной части и проверялось эмиссионной спектроскопией с преобразованием Абеля в работе Сакияма и др. [12]. Форма кольца плазменной пули объясняется излучением от границы между операционным газовым каналом и окружающим воздухом.

Плазменные струи, работающие с благородными газами могут быть классифицированы на четыре категории, т.е. диэлектрик-свободный электрод, диэлектрический барьерный разряд (ДБР), ДБР-подобные струи и одноэлектродные струи. Для ДБР струй есть много различных конфигураций. Как показано в работе [13], устройство состоит из диэлектрической трубки с двумя металлическими кольцевыми электродами на внешней стороне трубы. Когда рабочий газ (He, Ar) протекает через диэлектрическую трубку, и в этот момент включается источник питания высокого напряжения, холодная струя плазмы генерируется в окружающий воздух. Плазменная струя потребляет мощность всего в несколько Ватт. Температура газа плазмы близка к комнатной

температуре. Скорость потока газа составляет менее 20 м/с. Плазменная струя, которая выглядит однородной, как было упомянуто выше, является "пулей", распространяющейся со скоростью более 10 км/с. Считается, что приложенное электрическое поле играет важную роль в распространении "плазменных пуль". Существуют конфигурации, при которых устраняется один кольцевой электрод [14], что приводит к ослаблению разряда внутри диэлектрической трубки. В работе Уолша и Конга [15] было показано, что высокое электрическое поле вдоль плазменного факела является благоприятным для создания длинных плазменных "факелов" и более активной плазмы. В работе [16] приведена конфигурация, в которой удален основной кольцевой электрод, так что разряд внутри трубки ослаблен. Более сильный разряд внутри разрядной трубки помогает при генерации более активных форм химических радикалов, но с другой стороны приводит к увеличению температуры плазмы. Конфигурация, разработанная Ларусси и Лу [17], отличается от предыдущих четырех ДБР струйных аппаратов. Два кольцевых электрода прикреплены к поверхности двух центрально перфорированных диэлектрических дисков. Диаметр отверстия в центре дисков около 3 мм. Расстояние между двумя диэлектрическими дисками составляет около 5 мм. С помощью такого устройства может быть получен плазменный "факел" до нескольких сантиметров в длину. Все струйные аппараты ДБР, описанные выше, могут генерировать плазму от переменного тока или с помощью импульсного питания постоянного тока. Длина плазменной струи может легко достигать нескольких сантиметров или больше [18]. Эта возможность делает работу этих плазменных струй легкой и *практичной. Существует ряд других преимуществ ДБР струй: во-первых, из-за низкой мощности, подаваемой в плазму, температура газа плазмы остается близкой к комнатной. Во-вторых, из-за использования диэлектрика, не существует никакого риска возникновения искрового разряда вне зависимости от того, является ли обрабатываемый предмет размещенным далеко или близко к соплу.

Для определения максимально возможной видимой длины распространения стримеров в смеси гелий – воздух, в различных экспериментальных условиях снимались фотографии плазмы высокой четкости [19]. На первый взгляд, длина в основном зависит от амплитуды напряжения и скорости потока газа, в то время как она остается практически невосприимчивой к изменениям частоты. В зависимости от частоты, значения от 7 до 15 кГц не влияют на длину струи, в то время как за пределами 15 кГц наблюдается небольшое снижение. Кроме того, экспериментально показано, что, с увеличением частоты температура газа повышается. В связи с этим, оптимальные экспериментальные параметры системы для длительного производства плазменной струи имеют следующие значения: $V_{pp}^{1/4} 11$ кВ, $Q^{1/4} 2$ ОДС и $f^{1/4} 10$ кГц.

Такие устройства, основанные на барьерном разряде при атмосферном давлении с плазменными струями называют микроплазмотронами. Все они работают без применения вакуумных систем и отличаются способностью работать при атмосферном давлении.

Экспериментальная установка

Схема экспериментальной установки микроплазмотрона показана на рисунке 1. Основной частью установки является источник питания PVM 500, генерирующий сигналы переменного высокого напряжения. Частота работы генератора меняется в диапазоне 25 - 30 кГц, пики напряжения приходятся на 0-30 кВ, при этом мощность дополнительного сигнала можно увеличить вдвое.

На выходе источника питания имеются два выхода: первый - выход высокого напряжения, который собран в виде цилиндра и прикреплен к кварцевой трубке, второй - заземляющий порт. Два цилиндрических электрода параллельно прикреплены к кварцевой трубке. Расстояние между двумя электродами 15 мм. Электрический разряд появляется между этими двумя электродами. Используется синусоидальный сигнал от источника питания с частотой $f=30$ кГц, на протяжении всей работы частота остается неизменной. Расход газа $Q=6$ л/мин, используются газы He с чистотой 99,99%, и Ar

(99,8%). Длина кварцевой трубки 80 мм, диаметр 9 мм, внутренний диаметр 7 мм.

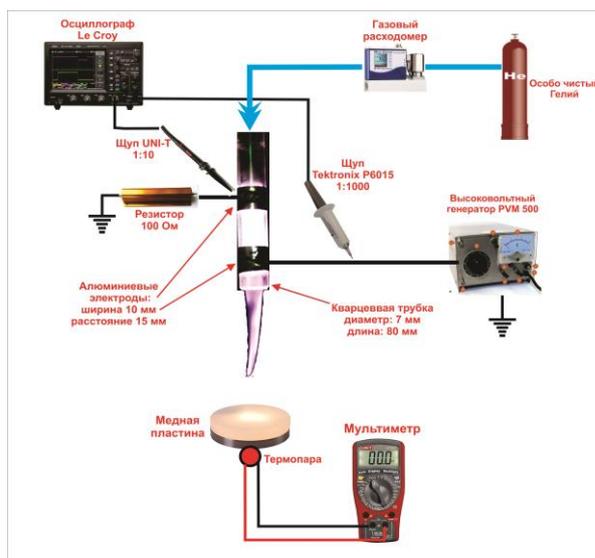


Рисунок 1.- Схема экспериментальной установки микроплазмотрона

Использование именно кварцевой трубки объясняется необходимостью устойчивости ее к высоким температурам. Через кварцевую трубку подается газ He или Ar, вследствие чего разряд, генерируемый между электродами, переносится на конец трубки и появляется плазменная струя. Газовый расходомер показывает расход газа в минуту. Осциллограф (LeCroy) выдает данные напряжения и тока, по которым вычисляются потраченные энергия и мощность. Так как подается высокое напряжение, используется делитель напряжения щуп (Tektronix P6015 1:1000). Для регулирования поступающего в микроплазмотрон тока в экспериментальной установке использовался проволочный резистор номиналом 100 Ом и 50 Вт. Также при построении ВАХ плазмы используются данные, полученные с помощью этого резистора. Температура плазмы определяется калориметром, который состоит из трех основных частей: медная пластина, термопара и мультиметр. Как было упомянуто выше, такие устройства используются для исследования характеристик плазмы и т.д. и имеют широкий спектр применения.

Результаты

Плазменную струю условно можно поделить на две области. Основная часть струи

приходится на разряд в области трубки между двумя электродами. В этой области происходит интенсивная ионизация газа и образование плазмы. Далее плазма уносится потоком газа за область трубки в окружающую среду на несколько сантиметров в зависимости от условий разряда. Эта область струи имеет низкую температуру и сложный химический состав и может быть применена в разных прикладных задачах.

Были проведены эксперименты для определения величины оптимального расхода газа и выявления оптимальных условий получения наиболее длинной плазменной струи (рисунок 2).

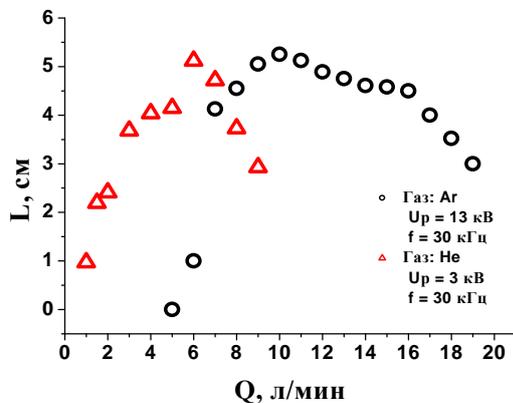


Рисунок 2.- Зависимость длины плазменной струи от расхода газа

В результате экспериментов, проведенных с He, было выявлено, что в зависимости от подаваемого расхода газа, вплоть до 6 л/мин, длина плазменной струи равномерно увеличивается, далее наблюдается уменьшение длины струи. А в случае с использованием Ag длина плазменной струи увеличивается, вплоть до 10 л/мин, далее она становится короче. Причиной такого обратного уменьшения длины струи является турбулентность при больших объемных расходах и соответственно при большой скорости газа в трубке. На рисунке 3 приведены фотоизображения плазменных струй при разных расходах газа для случая с гелием. Также были проведены исследования зависимости длины плазменной струи от приложенного напряжения на электродах. Надо отметить, что в случае с гелием пробой происходит при напряжениях разряда рав-

ным 1 кВ, а в экспериментах с Ag при 4,75 кВ. Исследование зависимости длины струи от напряжения разряда показало, что с увеличением напряжения длина плазменной струи увеличивается линейно. Для гелия характерно увеличение струи от 1 до 6 см, при увеличении напряжения от 1 до 3 кВ. Дальнейший рост подаваемого напряжения приводит к переходу основного разрядного промежутка в окружающую среду и появлению короткого замыкания в виде искрового разряда. В случае с аргонном критическое напряжение наступает при 13 кВ (рисунок 4).

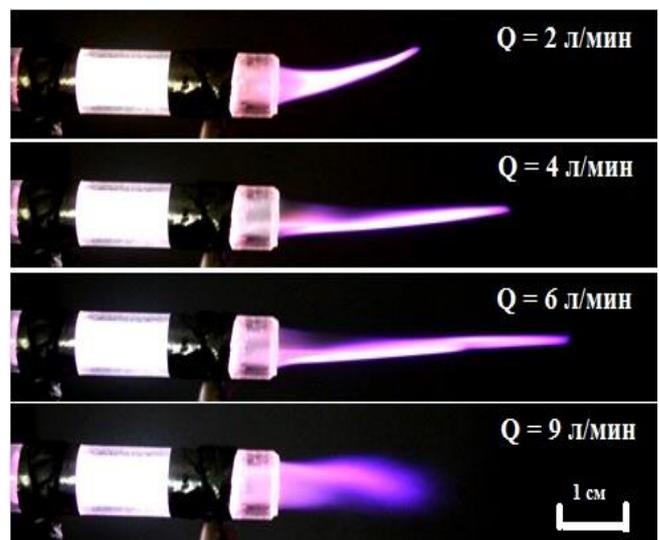


Рисунок 3.- Микроплазматрон в рабочем режиме при разных расходах газа. Рабочий газ гелий

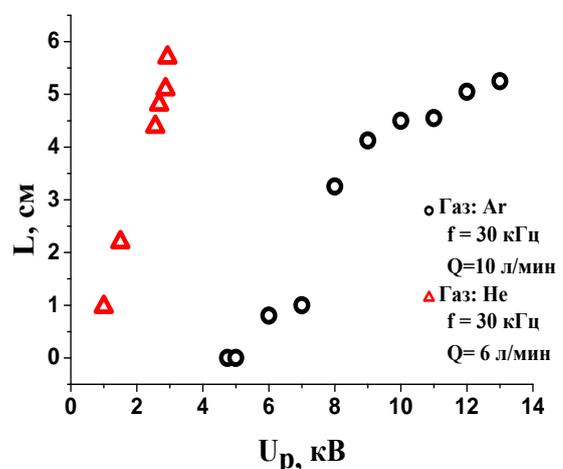


Рисунок 4- Зависимость длины плазменной струи от напряжения разряда

Статическая ВАХ была получена при фиксированном расходе газа и при постоянной частоте высоковольтного синусоидального напряжения.

На рисунке 5 приведены результаты измерения ВАХ. Как видно из рисунка, в обоих случаях ток разряда растет линейно относительно напряжения.

Для аргона значения тока находятся в диапазоне от 15 мА до 25 мА, что на порядок выше, чем ток разряда в случае с гелием.

Важнейшим параметром плазменной

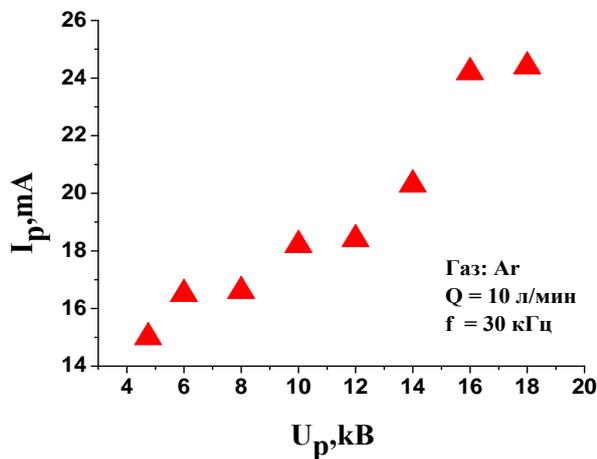
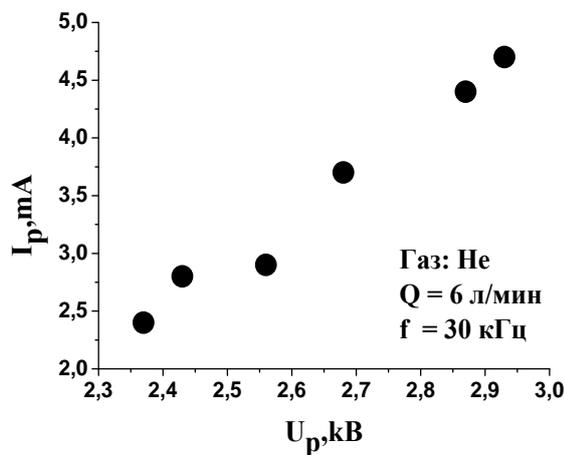


Рисунок 5.- Статическая ВАХ разряда при разных рабочих газах

струи является температура газа и плазмы на поверхности обрабатываемых материалов. Для оценки данной характеристики был применен метод калориметрического измерения. Калориметр был расположен на расстоянии 2,5 см от трубки, так как средняя

длина плазменной струи равна 5 см. Время экспозиции равно 1 минуте. На рисунках 6-7 приведены результаты измерения температуры поверхности калориметра при контакте с плазменной струей. В начале процесса воздействия плазменной струей температура начинает резко увеличиваться и через некоторый промежуток времени наступает насыщение. Характер поведения кривых является одинаковым при разных потоках газа и в случае с гелием и аргоном.

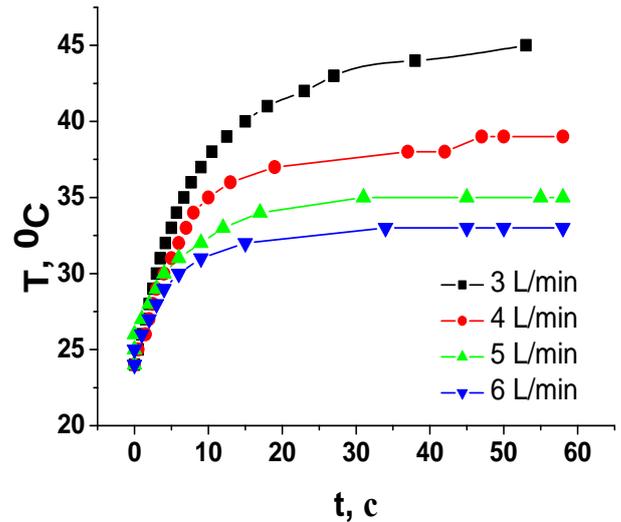


Рисунок 6.- Зависимость температуры калориметра в конце плазменной струи от расхода газа Ar

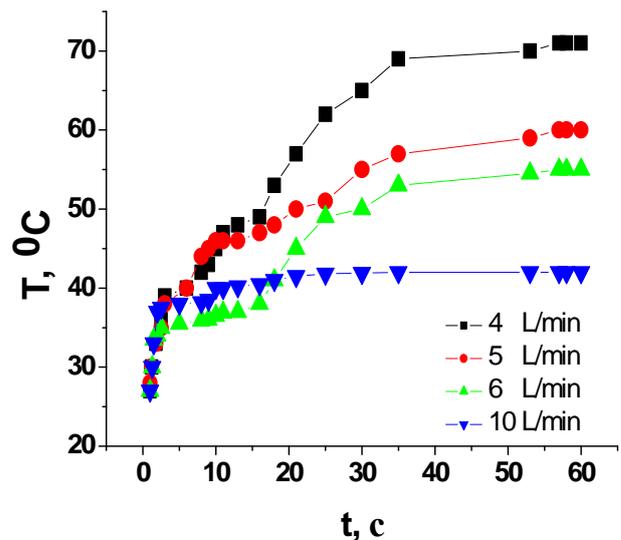


Рисунок 7.- Зависимость температуры калориметра в конце плазменной струи от расхода газа He

Температура при насыщении меняется в пределах от 30 °С до 40 °С, для гелия и 40 °С до 70 °С. В связи с полученными результатами по температуре, можно заключить, что в целях обработки плазмой биологических тканей, живых клеток и термочувствительных материалов более безопасно использовать гелий в качестве рабочего газа для генерации плазменной струи.

Заключение

Структурные и электрические свойства плазменной струи исследовались с помощью статических вольтамперных характеристик. С помощью калориметрического метода была определена зависимость между потоком газа и длиной, температурой плазменной струи. Для определения максимально возможной видимой длины распространения стримеров в смеси гелий – воздух, в различных экспериментальных условиях снимались фотографии плазмы высокой четкости. Результаты показали, что длина плазменной струи в основном зависит от амплитуды напряжения и скорости потока газа, а к изменению частоты остается практически невосприимчивой. Также были получены результаты по изменению величин тока и напряжения, необходимых для ионизации инертных газов.

Работа выполнена при поддержке программы Грантового финансирования научных исследований МОН РК, грант 3220/ГФ4.

Список литературы

- 1 Y.A. Ussenov, T.S. Ramazanov, M.T. Gabdullin, M.K. Dosbolayev, T.T. Daniyarov, Investigation of electrical and optical properties of dielectric barrier discharge // *Physical Sciences and Technology*, vol. 2, no. 1, pp. 9-12, 2015.
- 2 M. Laroussi and T. Akan, Arc-free atmospheric pressure cold plasma jets: A review // *Plasma Process. Polym.*, vol. 4, no. 9, pp. 777–788, 2007.
- 3 X. Lu, M. Laroussi, and V. Puech, On atmospheric-pressure nonequilibrium plasma jets and plasma bullets // *Plasma Sour. Sci. Technol.*, vol. 21, no. 3, p. 034005, 2012.
- 4 X. Lu, G. V. Naidis, M. Laroussi, and K. Ostrikov, Guided ionization waves: Theory and

- experiments // *Phys. Rep.*, vol. 540, no. 3, pp. 123–166, 2014.
- 5 K. D. Weltmann, E. Kindel, T. von Woedtke, M. Hähnel, M. Stieber, and R. Brandenburg, Atmospheric-pressure plasma sources: Prospective tools for plasma medicine // *Pure Appl. Chem.*, vol. 82, no. 6, pp. 1223–1237, 2010.
- 6 M. Laroussi, Low-temperature plasmas for medicine? // *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 37, no. 6, pp. 714–725, Jun. 2009.
- 7 Е. А. Усенов, М.Т. Габдуллин, М.К. Досболаев, Т.Т. Данияров, Т.С. Рамазанов, Электрические и оптические свойства диэлектрического барьерного разряда // *KazNU Bulletin. Physics series. №1 (56)*. 2016.
- 8 M. Teschke, J. Kedzierski, E. G. Finantu-Dinu, D. Korzec, and J. Engemann, High-speed photographs of a dielectric barrier atmospheric pressure plasma jet // *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 33, no. 2, pp. 310–311, Apr. 2005.
- 9 X. Lu and M. Laroussi, Dynamics of an atmospheric pressure plasma plume generated by submicrosecond voltage pulses // *J. Appl. Phys.*, vol. 100, no. 6, p. 063302, 2006.
- 10 N. Mericam-Bourdet, M. Laroussi, A. Begum, and E. Karakas, Experimental investigations of plasma bullets // *J. Phys. D, Appl. Phys.*, vol. 42, no. 5, p. 055207, 2009.
- 11 J. Jarrige, M. Laroussi, and E. Karakas, Formation and dynamics of plasma bullets in a non-thermal plasma jet: Influence of the high-voltage parameters on the plume characteristics // *Plasma Sour. Sci. Technol.*, vol. 19, no. 6, p. 065005, 2010.
- 12 Y. Sakiyama, D. B. Graves, J. Jarrige, and M. Laroussi, Finite element analysis of ring-shaped emission profile in plasma bullet // *Appl. Phys. Lett.*, vol. 96, no. 4, p. 041501, 2010.
- 13 Teschke M, Kedzierski J, Finantu-Dinu E G, Korzec D and Engemann J 2005 *IEEE Trans. Plasma Sci.* 33 310
- 14 Li Q, Li J T, Zhu W C, Zhu X M and Pu Y K 2009 *Appl. Phys. Lett.* 95 141502
- 15 Walsh J L and Kong M G 2008 *Appl. Phys. Lett.* 93 111501
- 16 Lu X, Jiang Z, Xiong Q, Tang Z and Pan Y 2008 *Appl. Phys. Lett.* 92 151504
- 17 Laroussi M and Lu X 2005 *Appl. Phys. Lett.* 87 113902

18 Lu X, Jiang Z, Xiong Q, Tang Z, Hu X and Pan Y 2008 *Appl. Phys. Lett.* 92 081502

19 K. Gazeli, P. Svarnas, P. Vafeas, P. K. Papadopoulos, A. Gkelios and F. Clement, Investigation on streamers propagating into a helium jet in air at atmospheric pressure: Electric

cal and optical emission analysis // *Journal of applied physics*, no. 114, p. 103304, 2013.

Принято 05.11.2016

Ә.С. Пазыл, А.Қ. Акильдинова, Е.А. Үсенов, М.Қ. Досболаев, М.Т. Габдуллин, Т.Т. Данияров, Т.С. Рамазанов

Әл-Фараби атындағы ҚазҰУ, АТҰНЗ, Әл-Фараби, 71, 050040, Алматы

АТМОСФЕРАЛЫҚ ҚЫСЫМДАҒЫ ТӨМЕН ТЕМПЕРАТУРАЛЫ ПЛАЗМА АҒЫНЫ

Аннотация: Бұл жұмыста гелий мен аргон секілді инертті газдар ортасындағы атмосфералық қысымдағы төмен температуралы плазма ағынының электрлік, құрылымдық қасиеттері мен температурасын өлшеу нәтижелері келтірілген. Плазмалық жалынның формасы мен ұзындығының разряд электродтарындағы түрлі кернеу мен газ ағынының шығынына тәуелділігі зерттелген. Диэлектрлік барьерлік разрядтың негізінде алынған атмосфералық қысымдағы плазма ағыны салыстырмалы түрде төмен температураға ие болатындығы және тірі жасушалар мен жоғары температураға сезімтал материалдарды өңдеуге пайдалануға мүмкін екендігі көрсетілген.

Кілт сөздер: атмосфералық қысымдағы төмен температуралы плазма, диэлектрлік барьерлік разряд, плазма ағыны, плазма температурасы.

А.С. Пазыл, А.К. Акильдинова, Е.А. Үсенов, М.К. Досболаев, М.Т. Габдуллин, Т.Т. Данияров, Т.С. Рамазанов

КазНУ им. аль-Фараби, ННЛОТ, аль-Фараби, 71, 050040, Алматы

НИЗКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ПЛАЗМА СТРУЙНОГО ТИПА ПРИ АТМОСФЕРНОМ ДАВЛЕНИИ

Аннотация. В данной работе представлены результаты исследования структуры, электрических свойств и температуры плазмы струйного типа при атмосферном давлении в среде инертных газов, таких как гелий и аргон. Были получены результаты измерения длины и формы плазменной струи при разных объемных расходах газа и разных значениях высоковольтного напряжения на электродах разряда и проведен сравнительный анализ. Показано, что плазменные струи при атмосферном давлении полученные на основе диэлектрического барьерного разряда имеют относительно низкую температуру и могут быть применены для обработки живых клеток и термочувствительных материалов.

Ключевые слова: низкотемпературная плазма атмосферного давления, диэлектрический барьерный разряд, плазменная струя, температура плазмы.

**A.S. Pazyl, A.K. Akildinova, Y.A. Ussenov, M.K. Dosbolayev, M.T. Gabdullin,
T.T. Daniyarov, T.S. Ramazanov**
Al-Farabi Kaz NU, NNLOT, Al-Farabi, 71, 050040, Almaty

COLD TEMPERATURE PLASMA JET AT ATMOSPHERIC PRESSURE

Annotation. This paper presents the results of studies of the structure, electrical properties and temperature of the atmospheric pressure plasma jet in noble gases such as helium and argon. The length and shape of the plasma jet with at different gas volume flow rates and at different values of high voltage on the discharge electrodes were compared. It was shown that the plasma jet under atmospheric pressure generated on the basis of dielectric barrier discharge has a relatively low temperature and can be used for treatment of living cells and heat sensitive materials.

Keywords: cold temperature plasma at atmospheric pressure, dielectric barrier discharge, plasma jet, plasma temperature.