

DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-3-186-194

Аппарат генерации воздушной плазменной струи «АЛОЭ»

А.В. Казак, Л.В. Симончик

Институт физики имени Б.И. Степанова Национальной академии наук Беларуси,
пр-т Независимости, 68-2, г. Минск 220072, Беларусь

Поступила 10.06.2024

Принята к печати 28.08.2024

Представлен аппарат генерации воздушной плазменной струи «АЛОЭ». От известных аналогов аппарат отличается компактностью, достигнутой за счёт отсутствия необходимости в использовании инертных газов (их заменяет окружающий воздух) и возможностью определения дозы воздействия. По своим характеристикам новинка соответствует мировому уровню. Отечественных аналогов нет. Приведены параметры и примеры использования данного прибора. Разработка будет востребована в сфере здравоохранения, ветеринарии, косметологии. Аппарат может быть применён для обеззараживания поверхностей, включая термочувствительные, такие как живые ткани, а также служить прототипом при разработке различных приборов физиотерапевтической направленности.

Ключевые слова: воздушная плазменная струя, аппарат «АЛОЭ», медицина, ветеринария

Адрес для переписки:

Казак А.В.
Институт физики НАН Беларуси,
пр-т Независимости, 68-2, г. Минск 220072, Беларусь
e-mail: a.pavlova@ifanbel.bas-net.by

Address for correspondence:

Kazak A.V.
B.I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences
of Belarus
Nezavisimosti Ave., 68-2, Minsk 220072, Belarus
e-mail: a.pavlova@ifanbel.bas-net.by

Для цитирования:

А.В. Казак, Л.В. Симончик.
Аппарат генерации воздушной плазменной струи «АЛОЭ».
Приборы и методы измерений.
2024. Т. 15. № 3. С. 186–194.
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-3-186-194

For citation:

A.V. Kazak, L.V. Simonchik
Air Plasma Jet Generation Apparatus "ALOE".
Devices and Methods of Measurements.
2024;15(3):186–194. (In Russ.).
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-3-186-194

DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-3-186-194

Air Plasma Jet Generation Apparatus "ALOE"

A.V. Kazak, L.V. Simonchik

*B.I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus,
Nezavisimosti Ave., 68-2, Minsk 220072, Belarus*

Received 10.06.2024

Accepted for publication 28.08.2024

Abstract

The article presents an apparatus for generating an air plasma jet "ALOE". The device differs from known analogues in its compactness achieved due to absence of need to use inert gases (because they are replaced by ambient air) and the ability to determine the exposure dose. In terms of its characteristics this new product corresponds to world standards. There are no domestic analogues of it. Parameters and examples of using this device are presented. It will be in demand for healthcare, veterinary medicine, and cosmetology. The device can be used for disinfection of surfaces, including heat-sensitive ones, such as living tissues, and can serve as a prototype for development of various physiotherapeutic devices.

Keywords: air plasma jet, apparatus "ALOE", medicine, veterinary medicine

Адрес для переписки:

Казак А.В.
Институт физики НАН Беларуси,
пр-т Независимости, 68-2, г. Минск 220072, Беларусь
e-mail: a.pavlova@ifanbel.bas-net.b

Address for correspondence:

Kazak A.V.
B.I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences
of Belarus
Nezavisimosti Ave., 68-2, Minsk 220072, Belarus
e-mail: a.pavlova@ifanbel.bas-net.by

Для цитирования:

А.В. Казак, Л.В. Симончик.
Аппарат генерации воздушной плазменной струи «АЛОЭ».
Приборы и методы измерений.
2024. Т. 15. № 3. С. 186–194.
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-3-186-194

For citation:

A.V. Kazak, L.V. Simonchik
Air Plasma Jet Generation Apparatus "ALOE".
Devices and Methods of Measurements.
2024;15(3):186–194. (In Russ.).
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-3-186-194

Введение

За последние 20 лет проведено множество исследований плазменных струй атмосферного давления как для фундаментального понимания плазменного разряда, так и для их потенциальных приложений [1–6, 7]. Способность производить «холодную» плазму в условиях атмосферного давления была основой для быстрого роста применения плазмы в биомедицине [8–12]. Плазма обладает рядом свойств, таких как заряженные частицы, электрический ток, ультрафиолетовое излучение, температура, активные молекулы, радикалы и метастабильности, которые могут действовать синергетически [1–4]. Противовоздушные, противомикробные, противовоспалительные, стимулирующие ткани, усиливающие кровоток и проапоптотические эффекты, продемонстрированы в экспериментах *in vivo* и *in vitro*, и до сих пор не наблюдалось устойчивости патогенов к плазменной обработке [9–14]. Сочетание различных биологически активных компонентов и их широкий спектр положительного воздействия на различные заболевания делает плазму привлекательной для применения в медицине.

На данный момент сертифицированы как медицинский продукт для лечения хронических ран у людей следующие устройства: DBD PlasmaDerm® VU-2010 (CINOGY Technologies GmbH, Германия) [15], струя плазмы атмосферного давления (APPJ) kINPen® MED (INP Greifswald/neoplas tools GmbH, Германия) [16] и SteriPlas (Adtec Ltd., Лондон, Великобритания) [17], которые показали эффективность и хорошую переносимость у пациентов.

Для инициирования холодных плазменных струй повсеместно используется диэлектрический барьерный разряд в различных частотных диапазонах со значительно различающимися иницирующими напряжениями и скоростями потока плазмообразующих газов (воздух, гелий, аргон, их смесей с кислородом, азотом). Основным биоактивным компонентом в этих струях является озон. Другие биоактивные компоненты (в том числе и азотные) в этих струях образуются уже при распространении струи в окружающем воздухе вне разрядной камеры. Это приводит к невозможности резуль-

татов исследований различных авторов вследствие различающейся геометрии экспериментальных установок, дизайна физико-биологических экспериментов, отсутствия стандартизированных методик облучения, отсутствия контроля и сравнения электрических характеристик различных объектов, а также влияния внешней среды и других неконтролируемых факторов.

В Институте физики НАН Беларуси разработан аппарат генерации воздушной плазменной струи «АЛОЭ» на основе тлеющего микроразряда в воздушной среде. Основными биоактивными компонентами воздушной плазменной струи являются NO, NO₂ и HNO₂. Известно, что окись азота (NO) является универсальным регулятором множества биологических и физиологических процессов, обладает антибактериальной активностью при воспалении, стимулирует местный иммунитет, ингибирует процессы свободнорадикального окисления. Окись азота управляет как внутриклеточными, так и межклеточными процессами в живой клетке. Такие болезни как гипертония, ишемия миокарда, тромбозы вызваны в том числе нарушением физиологических процессов, которые регулирует окись азота [18].

В данной работе представлено описание аппарата генерации воздушной плазменной струи «АЛОЭ» и его характеристики. Приведены рекомендации по его использованию для обработки различных объектов.

Устройство и принцип работы аппарата генерации воздушной плазменной струи «АЛОЭ»

Аппарат генерации воздушной плазменной струи «АЛОЭ» состоит из источника питания, компрессора, разрядной камеры и гибкого металлического шланга, внутри которого проходит трубка для подачи воздуха и высоковольтный провод. Принцип работы аппарата заключается в зажигании и поддержании в стабильном состоянии тлеющего электрического микроразряда между двумя электродами в разрядной камере, через которую осуществляется непрерывная продувка воздуха. Внешний вид аппарата представлен на рисунке 1.



Рисунок 1 – Фотография аппарата для генерации воздушной плазменной струи «АЛОЭ»

Figure 1 – Photo of the device for generating an air plasma jet "ALOE"

На панели управления расположен дисплей, кнопки уменьшения/увеличения выходного тока, кнопки уменьшения/увеличения времени обработки, кнопка запуска/остановки. Выходной ток можно выбирать из ряда значений 30, 35 и 40 мА. Время работы можно устанавливать от 1 до 20 мин с шагом 1 мин. В нижней части

дисплея индуцируется зелёная полоса, которая отображает продолжительность времени предварительного прогрева или охлаждения разрядной камеры.

Схема аппарата генерации воздушной плазменной струи приведена на рисунке 2. Разрядное устройство представляет собой кварцевую цилиндрическую разрядную камеру с внутренним диаметром 8 мм, внутри которой соосно расположены закругленный катод (стержень диаметром 6 мм) и плоский анод толщиной 4 мм, изготовленные из нержавеющей стали. Межэлектродный промежуток можно варьировать до 1 мм. Через разрядную камеру осуществляется постоянный поток воздуха, расход которого до 3 л/мин можно регулировать с помощью компрессора. Воздух подаётся через полость в катод, а выходит через отверстие диаметром 1,5 мм в середине анода.

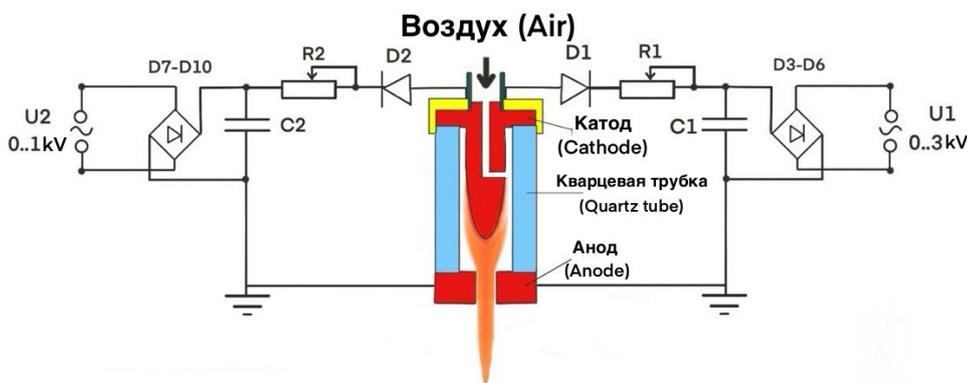


Рисунок 2 – Схема устройства генерации воздушной плазменной струи на постоянном токе в двухэлектродной конфигурации

Figure 2 – Scheme of a device for generating an air plasma jet at direct current in a two-electrode configuration

Для питания микроразряда используется два источника питания постоянного тока. Первый источник U_1 – напряжением до 3 кВ. Данное значение напряжения больше, чем напряжение пробоя для межэлектродного промежутка, например, 0,7 мм в воздухе при атмосферном давлении. Задача этого источника питания – обеспечить зажигание и непрерывное поддержание микроразряда при разрядном токе около 5 мА. Для увеличения тока разряда до 50 мА используется источник U_2 с постоянным напряжением до 1,5 кВ. Развязка источников питания осуществляется при помощи диодов D_1 и D_2 .

Характеристики плазменной струи

Химический состав воздушных плазменных струй зависит от температуры газа в области разряда [19]. Плазменные струи, генерируемые тлеющим микроразрядом в воздухе, характеризуются повышенной температурой, содержат азотные бактерицидные компоненты NO, NO₂ и HNO₂ [20, 21].

Основное производство монооксида азота происходит в неравновесной плазме тлеющего микроразряда, где N, O и OH образуются в плазмохимических реакциях с участием электронов. Принимая во внимание измеренную

температуру газа 1600 К, типичную плотность 10^{12} – 10^{13} см⁻³ и среднюю энергию электронов 1 эВ для разряда в молекулярных газах при токе 30 мА, анализ показывает, что эти процессы более эффективны, чем термическая диссоциация молекул азота, кислорода и воды. Кроме того, недостаточно высокая температура в разряде приводит к очень низкой скорости реакции атомов кислорода с молекулами азота. Поэтому образование NO не может быть правильно описано в рамках теплового механизма Зельдовича и требует кинетического анализа с учётом плазмохимических реакций.

Константа равновесия для реакции окисления оксида азота до диоксида азота составляет 0,0085 при температуре 1600 К и повышается при температуре ниже 800 К. Увеличение концентрации NO₂ начинается со снижения температуры вдоль оси разряда в разрядной камере и продолжается в струе.

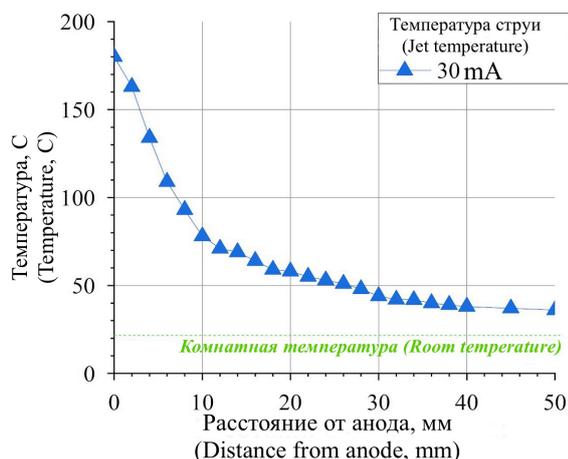
Молекулы азотистой кислоты, участвующие в реакции $\text{HNO}_2 + \text{M} \rightarrow \text{OH} + \text{NO} + \text{M}$, менее термически устойчивы, чем молекулы диоксида азота. Поэтому образование азотистой кислоты происходит при низких температурах за пределами зоны микроразряда.

В низкотемпературной зоне струи тлеющего микроразряда, где процесс дис-

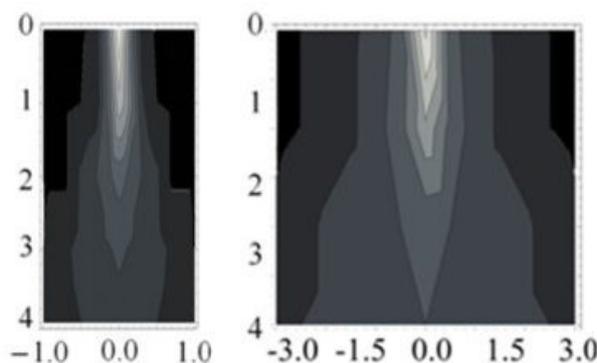
социации неэффективен, образования заметной концентрации озона не происходит, поскольку ранее быстрая трёхчастичная реакция образования NO₂ «отнимает» атомы кислорода, необходимые для образования O₃. Возникающие молекулы озона погибают в столкновениях с молекулами оксида азота и диоксида азота, уже имеющими значительную концентрацию.

Как показано в работе [22] профили распределения потока и температуры сильно меняются в зависимости от того, истекает струя в открытое пространство или на какой-то барьер, например, чашку Петри.

На рисунке 3 представлены пространственные профили температуры в случае струи, истекающей в открытое пространство (рисунок 3b) и на преграду (рисунок 3c) при одинаковом расходе газа 5 л/мин. Видно, что профиль газовой температуры струи при наличии преграды становится шире в 3 раза, распределение температуры газа приобретает колоколообразную форму. Такая форма распределения, вероятно, связана с растеканием струи вдоль поверхности чашки Петри, нагревом её и с восходящими горячими потоками, что требует дополнительных ограничений по температуре газа для работы с живыми объектами.



a



b

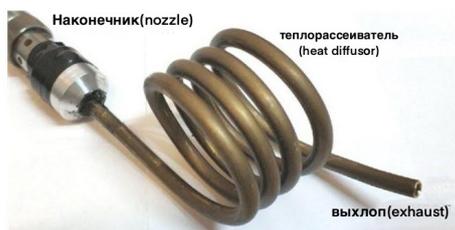
c

Рисунок 3 – Аксиальное распределение температуры газа в струе от расстояния от анода (a) и пространственные профили температуры в случае истекания струи в открытое пространство (b) и в случае истекания струи на барьер (c) при потоке 5 л/мин, токе 30 мА

Figure 3 – Axial distribution of gas temperature in the jet depending on the distance from the anode (a) and spatial temperature profiles at a flow of 5 l/min, a current of 30 mA in the case of a jet flowing into open space (b) and in the case of a jet flowing onto a barrier (c)

Для уменьшения температуры выхлопа предложено использовать протяжённый канал для доставки долгоживущих компонентов плазменной струи к области обработки. Для

этого использовалась медная трубка с внешним диаметром 6 мм и общей протяжённостью около полуметра, которая для удобства изогнута в виде спирали (рисунок 4а).



a



b

Рисунок 4 – Фотография наконечника с тепло-рассеивателем (a) и его ИК-снимок (b)

Figure 4 – Photo of the nozzle with a heat dissipator (a) and its IR image (b)

Спираль фиксировалась на внешней части разрядной камеры с помощью специального наконечника и выполняла роль тепло-рассеивателя (рисунок 4b). Газ, выходя из разрядной камеры, охлаждался по мере движения вдоль медной трубки до комнатной температуры без заметного изменения концентрации долгоживущих ИК-активных компонентов плазмы.

Концентрация бактерицидных компонент воздушной плазменной струи определялась методом абсорбционной ИК-спектроскопии. Спектры поглощения регистрировались с по-

мощью ИК Фурье-спектрометра Nexus (Thermo-Nicolet) с газовой кюветой 186-0305 (Perkin-Elmer). Оптический путь газовой кюветы составлял 135 см. Вся плазменная струя с отверстия в аноде направлялась с помощью силиконовой трубки в кювету. Вычисление спектров поглощения осуществлялось с использованием базы спектральных данных HITRAN [23]. Мольные доли бактерицидных компонент на выходе из отверстия в аноде разрядной камеры при различных условиях приведены в таблице.

Таблица /Table

Параметры воздушной плазменной струи

Parameters of the air plasma jet

| Параметры разряда Discharge parameters | | NO, ppm | NO ₂ , ppm | HNO ₂ , ppm |
|--|--|---------|-----------------------|------------------------|
| 1 | Разрядный промежуток 0,5 мм / Discharge gap 0.5 mm | | | |
| | Сила тока 30 мА / Current 30 mA | | | |
| | Расход воздуха 1,5 л/мин / Air flow 1.5 l/min | 500±25 | 250±25 | 50±5 |
| Диаметр вых. отверстия 4,0 мм / Outlet diameter holes 4.0 mm | | | | |
| 2 | Разрядный промежуток 0,5 мм / Discharge gap 0.5 mm | | | |
| | Сила тока 30 мА / Current 30 mA | | | |
| | Расход воздуха 1,5 л/мин / Air flow 1.5 l/min | 335±25 | 140±25 | 15±5 |
| Диаметр вых. отверстия 0,25 мм / Outlet diameter holes 0.25 mm | | | | |

Образующиеся мольные доли NO, NO₂ и HNO₂ в воздушной плазменной струе тлеющего микро-разряда атмосферного давления

экспоненциально убывают с расстоянием от анода и на расстоянии 4 см составляют около 40 ppm, 20 ppm и 10 ppm, соответственно.

Примеры применения аппарата «АЛОЭ»

Обработка чашек Петри в открытой атмосфере

Схема эксперимента представлена на рисунке 5. Разрядная камера закрепляется вертикально на лабораторном штативе (или другом держателе) таким образом, чтобы расстояние от выходного отверстия струи до поверхности было не менее 4 см. Установить чашку Петри таким образом, чтобы её центральная часть располагалась напротив отверстия выхода струи.

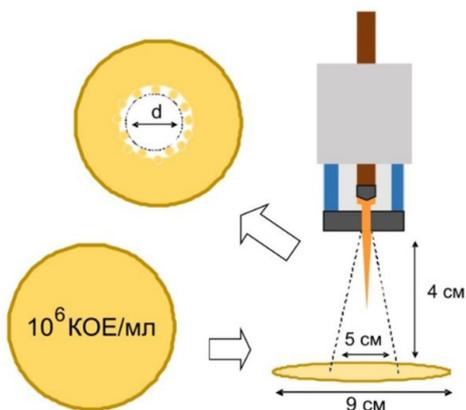


Рисунок 5 – Схема эксперимента с обработкой чашек Петри

Figure 5 – Scheme of the experiment with the treatment of Petri dishes

Установить на дисплее ток 30 мА и необходимое время обработки. Снять крышку с чашки Петри. Нажатием клавиши «Пуск-Стоп» включить аппарат «АЛОЭ».

После выключения разряда (короткий звук) закрыть чашку Петри и снять её для дальнейшего исследования.

Обработка изделий в частично замкнутом объёме

Схема эксперимента с обработкой изделий в частично замкнутом объёме представлена на рисунке 6. Изделие сложной формы, которое необходимо обработать, следует разместить на плоскую поверхность и накрыть ёмкостью в виде колпака. Выхлоп струи направить в объём-колпак сверху. Выход газов будет происходить через неровности прилегания колпака к поверхности.

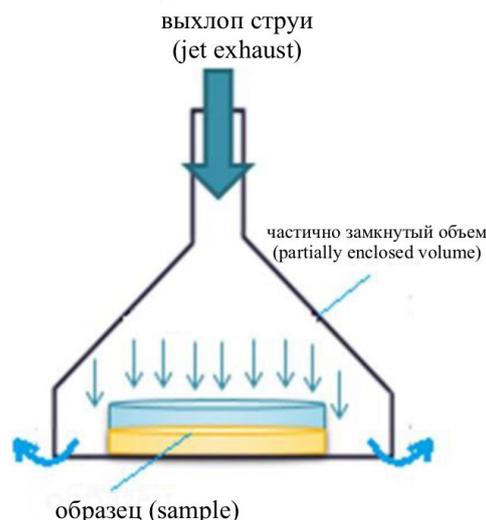


Рисунок 6 – Схема эксперимента с обработкой изделий в частично замкнутом объёме

Figure 6 – Scheme of the experiment with treatment the product in a partially closed state

Установить на дисплее ток 30 мА и необходимое время обработки.

Нажатием клавиши «Пуск-Стоп» включить аппарат «АЛОЭ». После выключения разряда достать изделие для дальнейшего исследования.

Обработка ран

Установить на дисплее ток 30 мА и необходимое время обработки. Нажатием клавиши «Пуск-Стоп» включить аппарат «АЛОЭ». После короткого сигнала включения основного разряда взять разрядную камеру в руку, как показано на рисунке 7, и поднести к участку тела, который следует обработать.



Рисунок 7 – Схема эксперимента с обработкой изделий в частично замкнутом объёме

Figure 7 – Scheme of the experiment with treatment the product in a partially closed state

Следить за тем, чтобы расстояние от отверстия выхлопа струи до объекта было не менее 4 см. Непрерывно перемещать разрядную камеру над обрабатываемой поверхностью раны. После выключения разряда (короткий звук) поместить разрядную камеру на подставку из негорючего материала.

Доза воздействия (облучения) и давление на объект обработки

При любом клиническом применении плазмы в качестве метода лечения определение дозы и её количественная оценка и, наконец, количественная связь дозы с медицинской эффективностью являются некоторыми из проблем плазменных струй, особенно, на основе барьерных разрядов. Немаловажным фактором является и давление, которое оказывает струя на обрабатываемый участок поверхности живого организма.

Проведем оценку давления струи для двух случаев: *A* – к спиральному теплорассеивателю присоединена силиконовая трубка с внутренним диаметром $d_1 = 4$ мм и *B* – в другой конец силиконовой трубки вставлена игла с внутренним диаметром $d_2 = 0,25$ мм.

Давления струи p рассчитывалось по формуле:

$$p = \rho v^2 / 2.$$

При 20 °С, атмосферном давлении 101,325 кПа и сухом воздухе плотность атмосферы составляет $\rho \approx 1,2041$ кг/м³.

Случай *A* – при внутреннем диаметре трубки $d_1 = 4$ мм при измеренном расходе воздуха $w_1 \approx 1,5$ л/мин скорость струи $v_1 \approx 2$ м/с. Тогда давление струи на выходе из трубки составит около $p_1 = 2,4$ Па.

Случай *B* – при внутреннем диаметре иглы $d_2 = 0,25$ мм при измеренном расходе воздуха $w_2 \approx 0,15$ л/мин скорость струи $v_2 \approx 50$ м/с. Тогда давление струи на выходе из трубки составит около $p_2 = 1500$ Па.

При воздействии на образцы доза будет определяться количеством активных частиц в потоке за время воздействия. Оценку числа частиц на выходе трубки и иглы за секунду будем производить по формуле:

$$N_x = w / 60 * N_L * \text{ppm}_x,$$

где w – расход воздуха в л/мин; N_L – число

Лошмидта; ppm_x – мольные доли активных частиц из таблицы.

Случай *A*: $N_{\text{NO}} \approx 3,4 \cdot 10^{17}$ частиц/с,
 $N_{\text{NO}_2} \approx 1,7 \cdot 10^{17}$ частиц/с, $N_{\text{HNO}_2} \approx 3,4 \cdot 10^{16}$ частиц/с.

Случай *B*: $N_{\text{NO}} \approx 2,3 \cdot 10^{16}$ частиц/с,
 $N_{\text{NO}_2} \approx 9,5 \cdot 10^{15}$ частиц/с, $N_{\text{HNO}_2} \approx 1,0 \cdot 10^{15}$ частиц/с.

Параметры расхода газа подбирались исходя из получения стабильного режима работы аппарата. В случае истекания большого потока (1,5 л/мин) через большее отверстие (4 мм) (случай ламинарной струи) имеется большее содержание биоактивных азотных частиц, что вероятно связано с большим пребыванием газа в области разряда. Во втором случае (0,25 л/мин, 0,25 мм) реализуется случай сильно турбулентной струи с содержанием частиц на 2 порядка меньше первого случая, при этом в первом случае соотношение NO/NO_2 составляет 2, во втором около 2,4.

Заключение

На основе тлеющего микрозаряда в воздухе разработан и изготовлен опытный образец – аппарат генерации воздушной плазменной струи «АЛОЭ». Основными компонентами воздушной плазменной струи при расходе воздуха 1,5 л/мин и разрядном токе 30 мА являются NO , NO_2 и HNO_2 с мольными концентрациями 500 ppm, 350 ppm и 50 ppm, соответственно. От известных мировых аналогов аппарат отличается компактностью, достигнутой за счёт отсутствия необходимости в использовании инертных газов – их заменяет окружающий воздух – и возможностью определения дозы воздействия. По своим характеристикам новинка соответствует мировому уровню. Отечественных аналогов нет. Предложено определение дозы для такого типа воздействия на различные объекты, которое формируется из количества (т. е. концентрации) биологически активных молекул на единицу времени воздействия на обрабатываемый объект.

Разработка будет востребована в сфере здравоохранения, ветеринарии, косметологии при получении соответствующих сертификатов и разрешений. Аппарат может быть применен для обеззараживания поверхностей, включая термочувствительные, такие как живые ткани, а также служить прототипом при разработке различных приборов физиотерапевтической направленности. В настоящее время готовится

программа и методика клинических испытаний для применений в стоматологии и челюстно-лицевой хирургии.

Благодарности

Работа выполнена при частичной поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (грант Ф22СРБГ-006).

Acknowledgments

The work was carried out with partial support from the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research (grant F22SRBG-006).

References

1. Schutze A. [et al.] The atmospheric-pressure plasma jet: a review and comparison to other plasma sources. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 1998;26(16):85-94. **DOI:** 10.1109/27.747887
2. Lu X, Laroussi M. and Puech V. On atmospheric-pressure non-equilibrium plasma jets and plasma bullets. *Plasma Sources Sci. Technol.*, 2012;21:034005. **DOI:** 10.1088/0963-0252/21/3/034005
3. Winter J, Brandenburg R. and Weltmann K-D. Atmospheric pressure plasma jets: an overview of devices and new directions. *Plasma Sources Sci. Technol.*, 2015;24:064001. **DOI:** 10.1088/0963-0252/24/6/064001
4. Lu X. and Ostrikov K. Guided ionization waves: The physics of repeatability. *Appl. Phys. Rev.*, 2018;5:031102. **DOI:** 10.1063/1.5031445
5. Morabit Y. [et al.] A review of the gas and liquid phase interactions in low-temperature plasma jets used for biomedical applications. *Eur. Phys. J.D*, 2021;75(32). **DOI:** 10.1140/epjd/s10053-020-00004-4
6. Lu X. [et al.] Cold atmospheric-pressure air plasma jet: Physics and opportunities. *Phys. Plasmas*, 2021;28:100501. **DOI:** 10.1063/5.0067478
7. Kong MG, Ganguly BN. and Hicks RF. Plasma jets and plasma bullets. *Plasma Sources Sci. Technol.*, 2012;21:030201. **DOI:** 10.1088/0963-0252/21/3/030201
8. Sadowska JM. [et al.] Plasma medicine: The great prospects when physics meets medicine. *Europhysics News*, 2022;53(3):20-23. **DOI:** 10.1051/eprn/2022303
9. Laroussi M. Sterilization of contaminated matter with an atmospheric pressure plasma. *IEEE Trans Plasma Sci.*, 1996;24:1188–91. **DOI:** 10.1109/27.533129
10. Kelly-Wintenberg K. [et al.] Room temperature sterilization of surfaces and fabrics with a one atmosphere uniform glow discharge plasma. *J Indust Microbiol Biotechnol.*, 1998;20:69-74. **DOI:** 10.1038/sj.jim.2900482
11. Laroussi M. [et al.] Images of biological samples undergoing sterilization by a glow discharge at atmospheric pressure. *IEEE Trans Plasma Sci.*, 1999;27:34-5. **DOI:** 10.1109/27.763016
12. Laroussi M. Non-Thermal decontamination of biological media by atmospheric pressure plasmas: review, analysis, and prospects. *IEEE Trans Plasma Sci.*, 2002;30:1409-15. **DOI:** 10.1109/TPS.2002.804220
13. Isbary G. [et al.] A first prospective randomized controlled trial to decrease bacterial load using cold atmospheric argon plasma on chronic wounds in patients. *Br.J. Dermatol.* 2010;163:78. **DOI:** 10.1111/j.1365-2133.2010.09744.x
14. Laroussi M. From killing bacteria to destroying cancer cells: twenty years of plasma medicine. *Plasma Process Polym.*, 2014;11:1138-41. **DOI:** 10.1002/ppap.201400152
15. Wandke D. “PlasmaDerm®-based on di_CAP technology”, In book: “Comprehensive Clinical Plasma Medicine”, 2018;495-502. **DOI:** 10.1007/978-3-319-67627-2_33
16. [Electronic Resource]. Available at: <https://neoplas-med.eu/produkt/> [Accessed 31.05.2024].
17. [Electronic Resource]. Available at: <https://adtechhealthcare.com/adtec-steriplas/> [Accessed 31.05.2024].
18. Butenko AV. [et al.] Review of clinical applications of nitric oxide-containing air-plasma gas flow generated by Plason device. *Clinical Plasma Medicine*. 2020;19-20:100112. **DOI:** 10.1016/j.cpme.2020.100112
19. Arkhipenko VI. [et al.] Mechanisms underlying the formation of inactivation components of an air dc plasma jet. *High Temperature Material Processes*. 2018;22(4):273-278. **DOI:** 10.1615/HighTempMatProc.2018029287
20. Kazak AV. [et al.] Bactericidal Components in Helium and Air Plasma Jets of a Dielectric Barrier Discharge. *Journal of applied spectroscopy*. 2021;88:293-298. **DOI:** 10.1007/s10812-021-01172-w
21. Kazak AV. [et al.] Inactivation of Consortiums of Microorganisms by an Air Plasma Jet at Atmospheric Pressure. *Plasma Medicine*. 2017;7(2):109-115. **DOI:** 10.1615/PlasmaMed.2017019263
22. Stepanova OM. [et al.] Spatial Distribution of Gas Temperature in an Air Plasma Jet of Direct Current Glow Microdischarge. *Tech. Phys. Lett.*, 2018;44:841-843. **DOI:** 10.1134/S1063785018090304
23. Kazak AV. [et al.] Bactericidal Components Diagnostics of Air Plasma Jets by IR and UV Absorption Spectroscopy. *Journal of applied spectroscopy*, 2024;91(3):352-360. (In Russ.).