

УДК 621.38

# Газорозрядні системи атмосферного тиску для біомедичних застосувань

Андрієнко<sup>f</sup> О. В.,Дрозд<sup>f</sup> І. М., ORCID [0000-0001-5152-1787](https://orcid.org/0000-0001-5152-1787)Кузьмичев<sup>s</sup> А. І., д.т.н. проф., ORCID [0000-0003-0087-275X](https://orcid.org/0000-0003-0087-275X)

Кафедра електронних пристроїв та систем

Національний технічний університет України

"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського" [kpi.ua](http://kpi.ua)

Київ, Україна

DOI: [10.20535/2617-0965.2020.3.3.198711](https://doi.org/10.20535/2617-0965.2020.3.3.198711)

**Анотація**—Проведено аналіз світової літератури, який свідчить про інтенсивний розвиток науково-технічного напрямку "Плазма в медицині", заснованого на застосуванні газорозрядних систем атмосферного тиску в біомедичному і озонотерапевтичному обладнанні. Вказані перспективи систем коронного розряду з металевими електродами. Розглянуто особливості коронного розряду і зроблено висновок про доцільність вивчення можливості створення обладнання для озонотерапії на безстрімерному біполярному коронному розряді постійного струму. Сформульовано завдання, які необхідно вирішити.

**Ключові слова** — біомедична апаратура; озонотерапевтична апаратура; розряд атмосферного тиску; коронний розряд; безстрімерний біполярний коронний розряд.

## І. ВСТУП

В останні десятиліття багато уваги приділяється розробці методів застосування газових розрядів і плазми у біомедичній апаратурі для лікування різних захворювань і хірургічних операцій, приготування лікарських засобів, дезінфекції та стерилізації медичних виробів, а також очищення, дезодорування та знезараження повітря [1, 2]. Даний напрямок отримав назву – "Плазма в медицині". Свідченням його актуальності та важливості є видання у США нового журналу "IEEE Transactions on Radiation and Plasma Medicine". Основні досягнення по цій темі представлені в [3-17].

В історичному плані плазмова біомедична апаратура є подальшим розвитком базису, що складається з такої відомої електрофізіотерапевтичної апаратури як високовольтні апарати постійного струму Франкліна (для т.зв. франклінізації), імпульсного струму д'Арсонваля (для дарсонвалізації), електричної люстри Чижевського та інших систем збагачення повітря іонами, озонаторів Сіменса, електричних фільтрів на коронному розряді для пиловловлювання, а також іонно-плазмової і плазмохімічної апаратури для обробки в електронній промисловості і отримання нових речовин в хімічній промисловості. Таким чином, біомедичний напрямок заснований на досягненнях газорозрядної техніки і технології в цілому.

Особливістю плазмової біомедичної апаратури є робота головним чином з об'єктами, що знаходяться або у відкритій атмосфері, або в камерах-ізоляторах при тиску близько атмосферного, а для створення

нетермічного плазмового середовища у газах високого тиску застосовуються особливі форми електричних розрядів і, як правило, висока напруга в одиниці-десятки кіловольт. Причому в багатьох випадках потрібно живлення розрядів змінним струмом кілогерцевого і мегагерцевого діапазонів або в імпульсному режимі. Для отримання нерівноважної нетермічної плазми атмосферного тиску (на відміну від сильноточних дугових і іскрових розрядів з рівноважною термічною плазмою) застосовують розряди з малою густиною струму і малою потужністю, і це той випадок, коли доцільно застосовувати розряди з вторинно-емісійним катодом. Нерівноважна плазма дозволяє реалізувати процеси, які неможливі в термічних розрядах і представляють великий інтерес для біомедичних застосувань. Наприклад, для генерації озону потрібна енергія електронів близько 10 еВ, але нагрів газу до температури, що відповідає такій енергії, призведе до миттєвого розпаду озону.

Одним з напрямків плазмової біомедицини є озонотерапія, оскільки озон найчастіше отримують за допомогою газорозрядних генераторів – озонаторів. Озон та озоновані речовини застосовують як лікувальний засіб, а також для дезінфекції та стерилізації медичних виробів, дезодорування та знезараження повітря [18, 19].

Для отримання озону можна використовувати різні види газових розрядів [20], але в більшості випадків використовують розряд з діелектричним бар'єром між металевими електродами і коронний розряд (КР) між оголеними металевими електродами, один з яких чи обоє мають малий радіус кривизни (завдяки формі електродів у вигляді нитки або



загострень) з локальним посиленням електричного поля. Також застосовують модифікації бар'єрного розряду – поверхневий (ковзний) і капілярний розряд, комбінації коронного розряду з бар'єрним і розряд з металевими електродами – поздовжній або поперечний тліючий розряд підвищеного тиску в потоці газу, мікרוструктуровані системи електродів та інші [21, 22]. Мета даної роботи – обговорення доцільності і особливостей застосування газорозрядних систем на базі КР атмосферного тиску в біомедицинській апаратурі, зокрема в озонотерапії.

## II. ОСОБЛИВОСТІ КОРОННОГО РОЗРЯДУ І ЙОГО ЗДІЙСНЕННЯ

Відзначимо ще раз, що в будь-якому із зазначених вище розрядах певну роль відіграє вторинна емісія електродів, навіть якщо електроди покриті діелектриком [21]. Ця емісія найсильніше проявляється у випадках утворення близько катода шару позитивного просторового заряду з великим падінням напруги, в якому прискорюються іони, що йдуть на катод, а також при генерації поблизу катода ультрафіолетового випромінювання, здатного викликати вторинну фотоелектронну емісію катода. Через низьку енергію іонів при атмосферному тиску газу для іонно-електронної емісії важливим є механізм потенційного виривання, а роль фотоелектронної емісії незважаючи на низькі значення її коефіцієнта може бути вирішальною в певних випадках. Може мати місце і вторинна електронна емісія, викликана збудженими і метастабільними атомними частками. Загальний коефіцієнт вторинної електронної емісії катода, тобто відношення струму електронної емісії до струму іонів на катоді, швидше за все, близько 0,01-0,1. Вторинні електронно-емісійні процеси найбільшою мірою реалізуються у КР з оголеним металевим катодом. У КР з зоною іонізації близько анода функціонує і інший тип вторинного емітера, в якості якого виступає зовнішня темна зона розряду у випадках, коли вона емітує вільні електрони і негативні іони у бік анода. Іони прискорюються і розпадаються у прианодній зоні з виділенням вільних електронів, які разом з електронами з зовнішньої зони теж прискорюються полем анода, іонізують газ і підтримують тим самим КР.

Ці обставини, а також те, що озонатори на коронному розряді мають певні конструктивні переваги перед озонаторами на бар'єрному розряді з діелектричним бар'єром, зумовили вибір апаратури на КР для дослідження і розробки в нашій роботі. Конструктивні переваги озонаторів на КР полягають у відсутності бар'єру і низькому опорі газовому потоку, тому немає необхідності істотно підвищувати тиск на вході в озонатори, а також можливості живлення озонаторів напругою постійного струму.

КР як електричне явище відомий давно і багато його характеристик проаналізовані та досить докладно описані в літературі [23]. Хоча далеко не всі особливості виявлені через різноманітність умов при конкретних застосуваннях. На рис. 1 – рис. 4 наведені типові електродні системи КР, його внутрішня структура і різновиди.

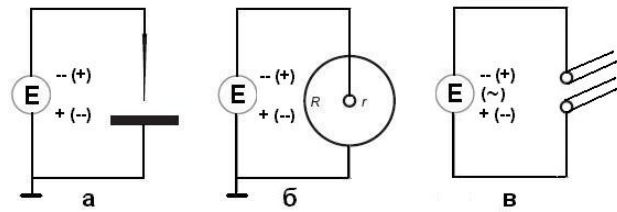


Рис. 1. Найпростіші електродні системи для створення коронного розряду: *а* – вістряна система, *б* – коаксіальна система "дріт/нитка" – порожнистий циліндр/труба", *в* – біполярна двопровідна система.

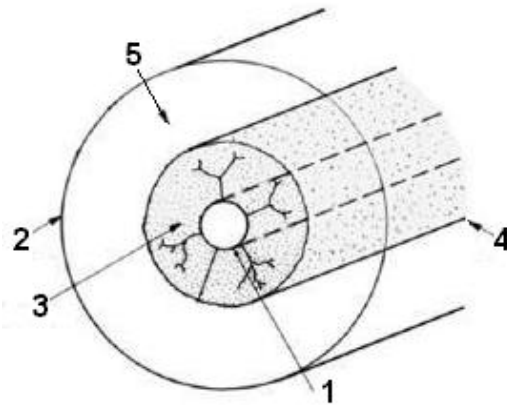


Рис. 2. Структура уніполярного КР на прикладі коаксіальної системи: *1* – внутрішній електрод, *2* – зовнішній електрод, *3* – зона іонізації, *4* – умовна границя зони іонізації, *5* – зовнішня зона (зона дрейфу іонів).

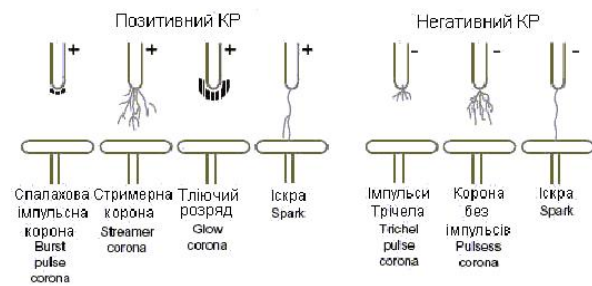


Рис. 3. Різновиди уніполярного КР в системі з вістрям [24].

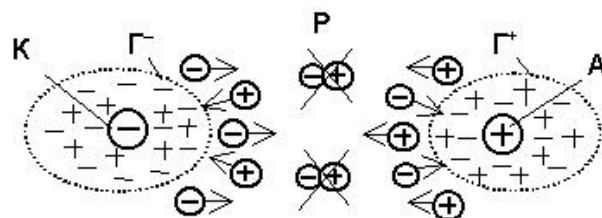


Рис. 4. Структура біполярного КР між двома дротами: *A* – анодний дріт, *K* – катодний дріт,  $\Gamma^+$  – границя катодної зони іонізації,  $\Gamma^-$  – границя анодної зони іонізації, *P* – рекомбінація заряджених частинок у зовнішній зоні (зоні дрейфу). Границі  $\Gamma$  позначають емітер частинок, що йдуть із зони іонізації (електронів ліворуч і позитивних іонів праворуч) і колектор частинок, що приходять (позитивних іонів зліва і негативних іонів / електронів праворуч).

КР — це відносно стабільний високовольтний слабкострумовий розряд з холодними вторинно-емісійними електродами, який сам підтримується

( $U \sim 1 \dots 100$  кВ; струм – мікро- і міліампери при розмірах електродів до 1 м, але досягає амперного діапазону в разі кілометрових високовольтних ліній передачі енергії). Її головна особливість – істотна неоднорідність розподілу електричного поля, при якому поле поблизу одного або обох активних (коронувальних) електродів набагато сильніше поля в іншій частині міжелектродного проміжку. Напруженість поля біля активного електрода повинна бути більше критичної (початкової)  $E_0$  для підтримки необхідної інтенсивності розмноження заряджених частинок в лавинному процесі іонізації газу електронами в умовах високого тиску газу. Для цього радіус кривизни поверхні електрода  $r$  повинен бути набагато менше довжини проміжку  $d$  (або  $r \ll R$ , див. рис. 1б); так, відношення  $r/d$  має бути менше 0,15.

Неоднорідний розподіл поля в КР дозволяє, по-перше, створювати розряд при помірно високій напрузі, а по-друге, частина розряду з низькою напруженістю поля діє як газовий баластовий резистор, стабілізуючи розряд. У разі плоских електродів або з великим  $r$  при підвищенні напруги відбувається іскровий пробій, минаючи стадію КР.

Для генерації озону може застосовуватися як уніполярний, так і біполярний КР, але другому присвячено набагато менше робіт. Він розглядався головним чином в системах з паралельних дротів, оскільки до них відносяться високовольтні лінії передачі енергії, рис. 1в і рис. 4.

За зовнішніми проявами КР визначають як безструмерний і зі струмерами (струмер – ниткоподібне нестационарне світне відгалуження від зони іонізації в зовнішню зону), див. рис. 2. Поява струмерів супроводжується електричними коливаннями. Розряд зі струмерами є перехідною фазою перед іскровим пробієм міжелектродного проміжку, тому не можна очікувати від нього стабільної генерації озону та інших продуктів.

З вище цитованої літератури і власної практики авторів відома велика різноманітність конфігурацій електродних систем для створення КР, але завжди вони мають електроди з малим радіусом кривизни поверхні: нитки, дроти, сітки, різні загострені голки, зубчики. Всі ці системи здатні генерувати озон, оскільки в них електрони мають енергію, необхідну для дисоціації молекул кисню в нетермічному газовому середовищі. Потім вільний атом кисню приєднується до молекули кисню з утворенням метастабільної молекули озону. Відзначимо, що КР і генерацію озону детально вивчали, головним чином, в системі “вістря – площа” або “дріт в трубі”. Даних з генерації озону у біполярному ГР вельми недостатньо для розробки озонотерапевтичного апарату, хоча така форма розряду цікава оскільки потребує відносно невеликих значень напруги живлення і працює на постійному струмі.

#### ВИСНОВКИ

Аналіз опублікованої науково-технічної інформації вказує на можливість створення і доцільного використання розрядно-плазмової апаратури різних типів

для біомедичних застосувань, в тому числі в озонотерапії. Перспективною є апаратура на базі електродних систем з коронним розрядом. Але для практичної реалізації подібної апаратури слід виконати дослідження озоногенеруючої системи з метою вибору оптимальної конфігурації металевих електродів і режиму електричного живлення. На наш погляд найбільш цікаво спрямувати дослідження на застосування безструмерної форми біполярного коронного розряду.

Виходячи з міркувань практичного, тобто реального і поширеного у майбутньому, використанню озонотерапевтичної апаратури на базі коронного розряду, необхідно забезпечити зберігання експлуатаційних параметрів апаратури протягом 8-ми годинного робочого дня при загальній тривалості напруцювання не менше 1000 годин. Ці здатності повинні бути експериментально підтверджені. Також необхідно забезпечити лінійність градувальної характеристики озонатора, математично формалізувати її і визначити вплив на неї різних факторів.

Також слід визначити за участю медичних співвиконавців терапевтичну ефективність створюваної апаратури і її придатність для виконання стерилізаційної обробки.

#### ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- [1] S. Samukawa, M. Hori, S. Rauf *et al.*, “The 2012 plasma road,” *J. Appl. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 45, pp. 253001-1–253001-37, 2012, DOI: [10.1088/0022-3727/45/25/253001](https://doi.org/10.1088/0022-3727/45/25/253001).
- [2] I. Adamovich, S. D. Baalrud, A. Bogaerts *et al.*, “The 2017 plasma road: Low temperature plasma science and technology,” *J. Appl. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 50, pp. 323001-1–323001-46, 2017, DOI: [10.1088/1361-6463/aa76f5](https://doi.org/10.1088/1361-6463/aa76f5).
- [3] “Special Issue on Plasma Medicine,” *Plasma Proc. Polym.*, vol. 5, no. 6, pp. 495–621, 2008, URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/toc/16128869/5/6>.
- [4] G. Fridman, G. Friedman, A. Gutsol *et al.*, “Applied Plasma Medicine,” *Plasma Proc. Polym.*, vol. 5, no. 6, pp. 503–533, 2008, DOI: [10.1002/ppap.200700154](https://doi.org/10.1002/ppap.200700154).
- [5] V. N. Vasilets, A. F. Gutsol, A. B. Shekhter, A. Fridman, “Plasmennaya meditsina [Plasma medicine],” *Khimiya vysokikh energiy*, vol. 43, no. 3, pp. 276–280, 2009, URL: <https://revolution.allbest.ru/medicine/d00418889.html>.
- [6] M. Laroussi, “Low-temperature plasmas for medicine?” *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 37, no. 6, pp. 714–725, 2009, DOI: [10.1109/TPS.2009.2017267](https://doi.org/10.1109/TPS.2009.2017267).
- [7] M. Kong, G. Morfill, T. Nosenko *et al.*, “Plasma medicine: an introductory review,” *New J. Phys.*, vol. 11, pp. 115012-1–115012-35, 2009, URL: <http://iopscience.iop.org/1367-2630/11/11/115012>.
- [8] Th. von Woedtke, S. Reuter, K. Masur, “Plasmas for medicine,” *Physics Reports*, vol. 530, no. 4, pp. 291–320, 2013, DOI: [10.1016/j.physrep.2013.05.005](https://doi.org/10.1016/j.physrep.2013.05.005).
- [9] Th. von Woedtke, H.-R. Metelmann, K.-D. Weltmann “Clinical Plasma Medicine: State and Perspectives of in Vivo Application of Cold Atmospheric Plasma,” *Contrib. Plasma Phys.*, vol. 54, no. 2, pp. 104–117, 2014, DOI: [10.1002/ctpp.201310068](https://doi.org/10.1002/ctpp.201310068).
- [10] D.B. Graves, “Mechanisms of Plasma Medicine: Coupling Plasma Physics, Biochemistry, and Biology,” *IEEE Trans. Rad. Plasma Med. Sci.*, vol. 1, no. 4, pp. 281–292, 2017, DOI: [10.1109/TRPMS.2017.2710880](https://doi.org/10.1109/TRPMS.2017.2710880).



- [11] D.B. Graves, "The emerging role of reactive oxygen and nitrogen species in redox biology and some implications for plasma applications to medicine and biology," *J. Phys. D. Appl. Phys.*, v. 45, no. 26, pp. 263001-1–263001-42, 2012. DOI: [10.1088/0022-3727/45/26/263001](https://doi.org/10.1088/0022-3727/45/26/263001).
- [12] H. Tanaka, K. Ishikawa, M. Mizuno *et al.*, "State of the art in medical applications using non-thermal atmospheric pressure plasma," *Rev. Mod. Plasma Phys.*, vol. 1, no. 3, pp. 1–90, 2017. DOI: [10.1007/s41614-017-0004-3](https://doi.org/10.1007/s41614-017-0004-3).
- [13] S. Guceri, A. Fridman (eds.), *Plasma Assisted Decontamination of Biological and Chemical Agents*, Springer, 2008. ISBN 978-1-4020-8439-3.
- [14] A. N. Aleinik, *Plasmennaya meditsina [Plasma Medicine]*, Tomsk, TPU, 2011, URL: <http://www.booksmed.com/biologiya/2417-plazmennaya-medicina-aleynik-uchebnoe-posobie.html>.
- [15] M. Laroussi, M. Kong, G. Morfill, W. Stolz (eds.), *Plasma Medicine. Application of low-temperature gas plasmas in medicine and biology*, Cambridge Univ. Press, 2012. ISBN-13: 978-1107006430.
- [16] Z. Machala, K. Hensel, Yu. Akishev (eds.), *Plasma for Bio-Decontamination, Medicine and Food Security*, Springer, 2012, URL: <https://www.springer.com/gp/book/9789400728516>.
- [17] K.H. Becker, U. Kogelschatz, K.H. Schoenbach, R.J. Barker, *Non-Equilibrium Air Plasmas at Atmospheric Pressure*, Bristol: IOP Publishing, 2005. ISBN 9780367864170.
- [18] A. G. Bogdanov, A. A. Voitenko, S. V. Denbnovetskiy *et al.*, "Tekhnika s tekhnologiya ozonoterapii [Technique and Technology of Ozonotherapy]," *Ukrainskiy Zhurnal medychnoi tekhniki s tekhnologii*, no. ½, pp. 22–26, 1994.
- [19] V. A. Malanchuk, V. D. Tsidelko, A. V. Kopchak, A. I. Kuzmichev, "Ozonoterapiya v stomatologii i c helyustno-litsevoy khirurgii [Ozonotherapy in Stomatology and Maxillo-Facial Surgery]," *Ukrainskiy medychnyi chasopis*, vol. XI/XII, no. 6 (20), pp. 61-68, 2000.
- [20] V. V. Lunin, M. P. Popovich, S. N. Tkachenko, *Fizicheskaya khimiya ozona [Physical Ozone Chemistry]*, Moscow: MGU, 1998. ISBN: 5-211-03719-7.
- [21] A. I. Kuzmichev, V.D. Tsydelko, "Primenenie razryadov atmosfernogo davleniya s netermicheskoj plasmoy i vtorichnymi emitterami v biomedichinskoj apparature [Application of atmospheric pressure discharges with non-thermal plasma and secondary emitters in biomedical apparatus]," *Kharkovskaya chirurgicheskaya shkola*, no. 3 (26), pp. 199-200, 2007.
- [22] A. I. Kuzmichev, R.Yu. Chaplinskiy, "Plasmennyye sistemy vysokogo davleniya s mikrostrukturirovannymi elektrodami. Chast' 1. Fizicheskie osnovy generatsii netermicheskoj plasmy pri atmosfernom davlenii [Plasma high pressure systems with microstructured electrodes. Part 1. Physical bases for generation of non-thermal plasma at atmospheric pressure]," *Electronics and Communication*, vol. 19, no. 3(80), pp. 21-26, 2014.
- [23] I. P. Verechshagin, *Koronnyi razryad v apparatakh electronno-ionnoy tekhnologii [Corona discharge in electron-ion technology apparatus]*, Moscow: Energoatomizdat, 1985.
- [24] J.-S. Chang, P. A. Lawless, T. Yamamoto, "Corona Discharge Processes," *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 19, no. 6, pp. 1152–1166, 1991. DOI: [10.1109/27.125038](https://doi.org/10.1109/27.125038).

DOI: [10.20535/2617-0965.2020.3.3.198711](https://doi.org/10.20535/2617-0965.2020.3.3.198711)

UDC 621.38

## Gas Discharge Atmospheric Pressure Systems for the Biomedical Use

O. V. Andrienko<sup>f</sup>,I. M. Drozd<sup>f</sup>, ORCID [0000-0001-5152-1787](https://orcid.org/0000-0001-5152-1787)A. I. Kuzmichev<sup>s</sup>, Dr.Sc. (Eng.) Prof., ORCID [0000-0003-0087-275X](https://orcid.org/0000-0003-0087-275X)

Electron Devices and Systems Department

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" [kpi.ua](http://kpi.ua)

Kyiv, Ukraine

**Abstract**— The analysis of world literature is carried out, which indicates the intensive development of the scientific and technical field "Plasma in Medicine" based on the use of different gas-discharges for biomedical purposes. The atmospheric pressure plasma discharge systems have the favorite features and are very suitable for medical physiotherapy, bactericide treating and even for sterilization. The systems with non-thermal plasma are in the most use and one of their applications is generation of gas ozone. The given paper is devoted to looking for atmospheric pressure discharge modes, which are more suitable for ozone therapy equipment taking into account the peculiarities of such type of electronic apparatus. As practice shows, for the generation of ozone, discharges with a secondary-emission cathode and non-thermal plasma are most preferable, and of these two types of discharges are discharges with a dielectric barrier and corona discharges with uncoated metal electrodes. The article focuses on the appropriateness of the use of a corona discharge for ozone therapy equipment. This is justified by the fact that the corona discharge ozonizers have certain design advantages over the ozonizers on the discharge with dielectric barriers, namely that the advantages of the ozonizers on the corona discharge are the absence of a expensive barrier and low resistance to the gas flow, so there is no need to significantly increase the pressure at the ozonizer oxygen inlet, and possibility of power supplying the ozonizer with DC voltage. Also, ozonizers on the corona discharge have a lower cost. From the literature and the authors' own practice, there is a wide variety of configurations of electrode systems for creating the corona discharge, but they always have electrodes with a small radius of curvature of the surface: threads, wires, nets, various pointed needles, serrated electrodes. The article considers the physical mechanism of maintaining



the corona discharge of a unipolar or bipolar type and notes the role of secondary electron emission of the cathode. All types of corona discharge are capable of generating ozone because discharge electrons have the energy required to dissociate oxygen molecules in a non-thermal gas environment. Then a free oxygen atom attaches to an oxygen molecule to form a metastable ozone molecule. It is noted that the corona discharge and ozone generation were studied in detail mainly in unipolar point-of-plane or wire-in-pipe systems. The data on ozone generation in bipolar discharge is not enough to develop an ozone therapy apparatus, although this form of discharge is interesting because it requires relatively small values of the supply voltage and operates at a direct current. Based on the review of the prospects for the use of bipolar corona discharge in biomedical apparatus and practical considerations of the realistic and expanded future usage of bipolar corona equipment in the ozone therapy, the tasks have been formulated to be solved. It is necessary to thoroughly study the characteristics of the developed equipment and the influence of various external operational factors and physico-chemical processes in the ozonizer electrode system on them. It is necessary to ensure that the parameters of the equipment are maintained during operation, which means that during the eight-hour working day and with the total time between failures of at least 1000 hours. Also, it is necessary to take into account the effect of the decomposition of ozone molecules at elevated temperatures and not to allow excessive heating of the ozonizer. These requirements must be met by choice of the configuration and materials of the electrode system and must be experimentally verified. It is proposed to ensure the linearity of the calibration characteristics of the ozonizer and to formalize it mathematically to simplify the setting and maintenance of stable operating modes of ozone equipment. It is necessary to prove its therapeutic efficacy, including for sterilization treatment, with the participation of medical specialists.

*Keywords* — *biomedical equipment; ozonotherapy equipment; atmospheric pressure discharge; corona discharge; streamerless direct current bipolar corona discharge.*

