

## ЕЛЕКТРОНІКА, РАДІОТЕХНІКА ТА ЗАСОБИ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

УДК 621.31:537.523.3

В.І. Крижановський, А.І. Кузьмичев,  
Р.Ю. Чаплинський

### ПЛАЗМОВІ РЕАКТОРИ ДЛЯ ГЕНЕРАЦІЇ ОЗОНУ НА КОРОННОМУ РОЗРЯДІ З ВТО- РИННИМИ ЕМІТЕРАМИ ЕЛЕКТРОНІВ

#### Вступ

В останній час озон, завдяки його унікальним властивостям, знаходить широке застосування в різних галузях науки й техніки, а особливо в обробці води, медицині, санітарії, біології, екології та ін. [1–4]. Для генерації озону розроблено ряд різновидів плазмових реакторів з використанням різних типів газового розряду. Найбільше поширення отримали реактори на бар'єрному розряді завдяки їх високій продуктивності [5]. Такі реактори досить складні за конструкцією та потребують складних імпульсних джерел живлення. Також використовуються реактори на коронному розряді. Проте вони мають малу продуктивність, але завдяки простій конструкції та живленню від джерел постійного струму можуть бути справжньою альтернативою реакторам на бар'єрному розряді для застосування в ряді галузей медицини та метрології, де використовуються невеликі концентрації озону.

Коронний розряд є розрядом самостійного типу і підтримується за рахунок вторинної іонно-електронної та фотонно-електронної емісії. Він виникає при порівняно високому тиску, коли поле біля одного чи обох електродів досить велике. Тому плазма коронного розряду оточує місця на поверхні електродів із найбільшою неоднорідністю електричного поля (вістря, леза, тонкі проволоки). Коронний розряд має малий плазмовий об'єм відносно загального об'єму розрядного проміжку, тобто тільки незначна частина кисню, що проходить крізь реактор з коронним розрядом, задіяна в процесі генерації озону. При збільшенні напруги коронний розряд переходить у стримерну форму. Перехід до стримерної корони з високим струмом дає змогу отримати більші концентрації озону. Проте цей розряд нестабільний через часті переходи до іскрового розряду, який супроводжується різким підвищенням струму і "закороченням" джерела живлення. У цьому ви-

падку необхідно використовувати досить складні генератори наносекундних імпульсів.

Хід вольт-амперної характеристики одиночного слабкострумowego безстримерного коронного розряду допускає існування багатьох локалізованих паралельних розрядів такого виду без баластних резисторів, проте з відносно однорідним розподілом струму. Таким чином, можна збільшувати загальний струм та плазмовий об'єм всього коронного розряду. В подальшому паралельні розряди з багатьма локалізованими розрядними об'ємами будемо називати багатокоронним розрядом. Такий розряд можна отримати в системі з багатьма вістрями (голками) чи в системі з розподіленими електродами (наприклад, проволоками).

За останній час опубліковано значну кількість праць із генерації озону в коронному розряді [6, 7]. Результати цих публікацій досить розрізнені, оскільки вони отримані на системах з різною конфігурацією, розмірами і об'ємом розрядних проміжків, а також умов дослідження. При їх порівнянні неможливо встановити оптимальні геометрію електродної системи, електричні режими та відповідний газовий потік через реактор, які забезпечують оптимальні умови генерації озону з максимально можливою концентрацією.

#### Постановка задачі

Метою даної статті є дослідження основних типів багатокоронних електродних систем для визначення оптимальних умов генерації озону в багатокоронному розряді та можливості створення ефективніших плазмохімічних реакторів на основі цього розряду.

#### Засоби та методи дослідження

Для дослідження використовувалися типові двоелектродні реактори, які охоплюють широкий діапазон конструкцій їх електродних систем (рис. 1). На рис. 1, а показано систему з двох паралельних прямокутних пластин із розмірами 150×100 мм, на одній або на обох з яких рівномірно розміщувалися вістря у вигляді суцільних голок. Кількість голок на одному з електродів дорівнювала 91. У системі на рис. 1, б використовувалися пустотілі голки від медичних шприців, які між собою з'єднувалися електрично і мали загальний високовольтний вивід. У цьому випадку максимальна кількість голок

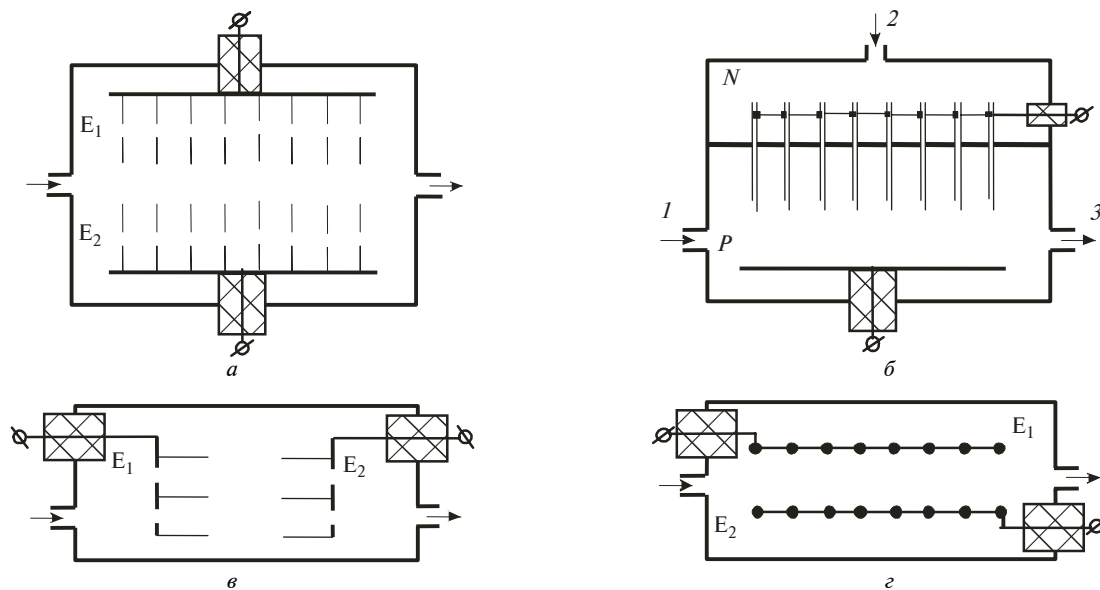


Рис. 1. Електродні системи реакторів із багатокоронними розрядами

становила 45. У системі на рис. 1, *в* голки розміщені вздовж потоку кисню. У реакторі на рис. 1, *г* електроди являли собою системи паралельно натягнутих вольфрамових проволокон (діаметром 0,5 мм та довжиною 150 мм), електрично з'єднаних між собою. У ході експерименту кількість проволокон змінювалась при сталій відстані між крайніми проволочками, яка дорівнювала 250 мм. Міжелектродний простір вибирався за умови відсутності появи стримерів та можливості їх переходу в іскровий розряд і становив приблизно 30 мм при напрузі 20–25 кВ. Кожна електродна система монтувалась на ізоляторах у камері з оргскла (рис. 1, *а*, *б*, *г*) чи скла (рис. 1, *в*), яка після монтажу герметизувалась. Камера мала штуцери для вводу кисню та виводу озono-кисневої суміші, а також електричні виводи електродів.

У реакторі на рис. 1, *а* кисень подавався поперек напрямку вістрів, а в реакторі на рис. 1, *в* – вздовж їх напрямку. Для вільного проходження газу в макеті, наведеному на рис. 1, *в*, електродні пластини виконано з перфораціями. В макеті на рис. 1, *б* поперечний напрямок кисню мав місце при подачі кисню через штуцер 1 (штуцер 2 заглушений), а повздовжній – через штуцер 2 (штуцер 1 заглушений). У цьому реакторі забезпечення режиму повздовжнього потоку, його внутрішній об'єм розділений на дві камери. Кисень через вхід 2 (при заглушеному вході 1) подається у верхню камеру, де рівномірно розподіляється між порожнинами голок і надходить до їх вістрів безпосередньо в

зону розряду. В реакторі з проволочними електродами (рис. 1, *г*) кисень подається поперек проволокон.

Як робочий газ використовувався кисень для медичного застосування, потік якого регулювався ротаметром в межах 1–10 л/хв. Вихідна концентрація озону вимірювалась оптичним аналізатором озону “Циклон-5.41” (виробник ОПТЕК, С.-Петербург, Росія). Живлення реакторів здійснювалось за допомогою стабілізованих джерел постійного струму напругою до 30 кВ. Реактор на рис. 1, *в* був оснащений датчиком температури, який розміщувався на його зовнішній поверхні. Для забезпечення стабільності параметрів дослідження реакторів проводилося після напрацювання їх протягом не менше ніж 200 год при максимальному струмі 1 мА.

### Результати експериментів та їх обговорення

У системах з голками (див. рис. 1, *а*, *б*, *в*) багатокоронний розряд візуально являв собою розрядні об'єми яскравого свічення, сконцентровані на кінчиках голок. У системах з проволочками локальні свічення спостерігалися на поверхні проволокон. Інтенсивність свічення у всіх системах збільшувалася із загальним зростанням розрядного струму.

На рис. 2 наведено вольт-амперні характеристики багатокоронного розряду в системах (див. рис. 1, *а*, *б*, *в*). Цифри на суцільних кривих вказують на кількість пустотілих голок, з'єднаних між собою та джерелом живлення

(рис. 1, б). Позначки  $NA$ ,  $NC$  і  $NAC$  вказують на розміщення голок на аноді, катоді чи обох електродах системи на рис. 1, а, відповідно. Криві з позначками  $W_1$ ,  $W_2$  відповідають кількості проволочок, які утворюють електроди  $E_1$ ,  $E_2$  в системі на рис. 1, з:  $W_1 = 13$ ,  $W_2 = 25$ . Дані на рис. 2 відповідають потоку кисню 1 л/хв. Аналогічні результати було отримано і для інших потоків кисню.

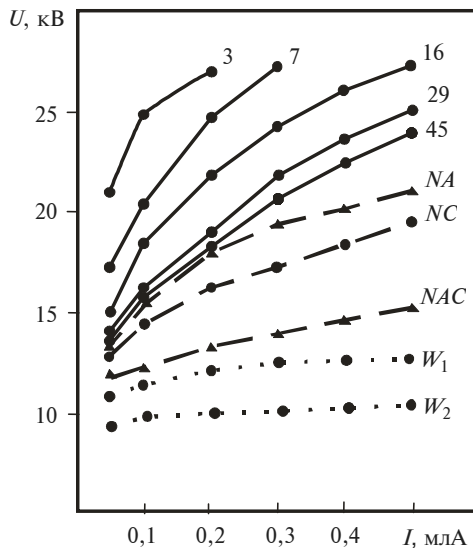


Рис. 2. Вольт-амперні характеристики багатокоронного розряду (суцільні лінії відповідають системі рис. 1, б, штрихові – системі рис. 1, а, точки – системі рис. 1, з)

Багатокоронні розряди, як видно, мають зростаючі вольт-амперні характеристики. Через це при більш високих напругах корона виникає також на тих ділянках електродної поверхні, де її раніше не було, тобто для збільшення загального струму в системі з багатокоронним розрядом необхідно підвищувати напругу на електродах.

Напруга багатокоронного розряду в системах з голками була менша для більшої кількості голок. У системі на рис. 1, а напруга була найменшою, коли голки були на обох електродах. Через те що кількість коронуючих осередків на катоді була найбільшою, у випадку електродів з проволочками вона мала найменшу напругу корони (криві  $W_1$  і  $W_2$  на рис. 2).

Діаграма на рис. 3 демонструє зміни концентрації озону на виході багатокоронних плазмових реакторів для двох значень загального струму коронного розряду  $I$  (0,25 і 0,5 мА) та потоку кисню  $Q$  (1,0 і 2,5 л/хв) крізь реактор. Типи реакторів показані у верхній частині

рис. 3. Кількість пустотілих голок у системі на рис. 1, б дорівнювала 45 (кисень подавався через штуцер 2).

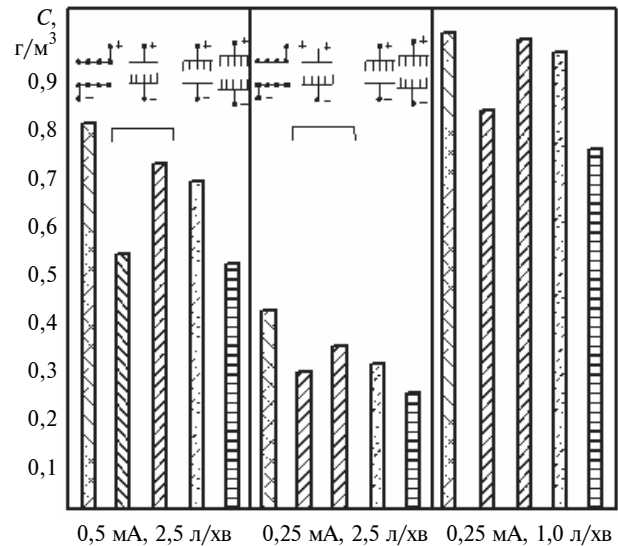


Рис. 3. Концентрація озону на виході багатокоронних реакторів з електродними системами і з суцільними голками

Встановлено, що розсіювання значень концентрації озону для різних електродних систем не перевищує 30 % відносно її середнього значення. Розсіювання зменшується з ростом концентрації озону. Слід відзначити, що дещо вищу концентрацію озону було отримано в системі з проволочками (див. рис. 1, з) та системі з голками на катоді (див. рис. 1, а) порівняно з іншими системами.

Рис. 4 дає можливість порівняти ефективність генерації озону в системі, показаній на рис. 1, б, з різною кількістю пустотілих голок, приєднаних до джерела живлення. Цифри 1 і 2 біля колонок вказують на місце входу кисню в реактор, тобто через штуцер 1 чи штуцер 2, відповідно (див. рис. 1, б). Верхні частини колонок на рис. 4 відповідають потоку кисню 1 л/хв, а їх нижні частини, які відділені горизонтальною лінією, відповідають потоку 2,5 л/хв.

Встановлено, що кількість коронуючих голок незначною мірою впливає на концентрацію озону при однаковому загальному струмі. Також концентрація озону слабо залежить від місця входу кисню в розрядний проміжок, тобто потік кисню через пустотілі голки (штуцер 2 на рис. 1, б) та наявність коронуючих осередків на їх кінцях не веде до значного підвищення генерації озону.

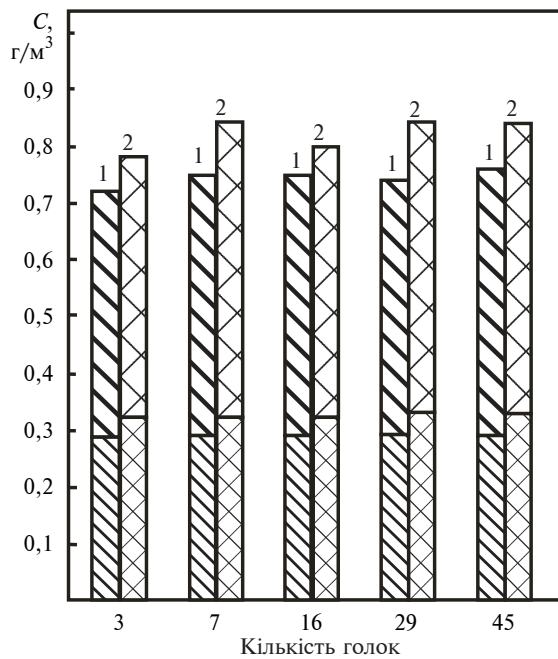


Рис. 4. Концентрація озону на виході реактора з електродною системою з пустотілими голками (загальний струм 0,25 мА)

Рис. 5 ілюструє залежність концентрації озону від загального струму в системах на рис. 1, б, г. Верхні криві відповідають потоку кисню в 1 л/хв, а нижні – 2,5 л/хв.

Положення кривих ще раз підтверджує факт слабкої залежності концентрації озону від типу електродної системи та напрямку потоку кисню.

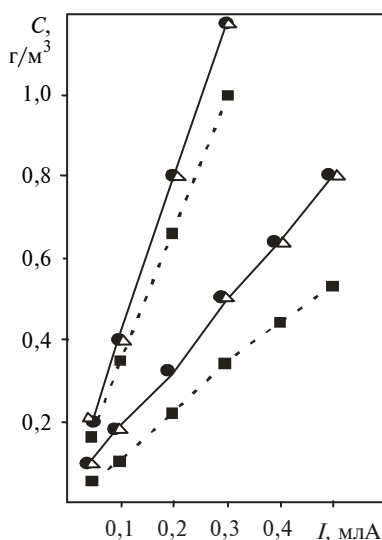


Рис. 5. Залежність концентрації озону від загального струму коронного розряду (суцільні лінії відповідають системі з проволочками рис. 1, г (кількість проволочок: 1 – 13; 2 – 25), крива 3 відповідає системі рис. 1, б з 45-ма голками, вхід кисню через штуцер 2); I – ●; 2 – △; 3 – ■

Аналіз кривих та діаграм вказує на пряму залежність концентрації озону  $C$  від сумарного струму корони  $I$  для будь-якого багатокоронного плазмового реактора, проте підвищення потоку кисню  $Q$  веде до зменшення концентрації озону на виході. У той же час потік кисню виступає як коефіцієнт пропорційності між концентрацією  $C$  і струмом  $I$ . Було визначено, що співвідношення між концентрацією озону і потоком кисню має гіперболічний характер:  $C \sim Q^{-m}$ , де  $m \approx 0,7$ . Останнє є цікавим фактом, оскільки для прямооточних реакторів із лінійним газовим потоком і малим використанням робочої речовини було б природним очікувати  $m = 1$ . Але в плазмовому реакторі має місце не тільки процес генерації озону, а й його руйнування в розряді –  $m$  буде менше одиниці.

Регресійний аналіз експериментальних результатів для трьох ідентичних реакторів з голками на обох електродах (див. рис. 1, в) дав можливість отримати математичний вираз вихідних концентрацій озону від струму в діапазоні 50–300 мкА та потоку кисню 1–10 л/хв. Для відстані між кінчиками протилежних голок 37 мм та їх кількості 15 на кожному електроді вираз має вигляд

$$C = 1,15 \cdot I \cdot Q^{-0,7314},$$

де  $C$  вимірюється в мг/м<sup>3</sup>,  $I$  – в мкА,  $Q$  – в л/хв. Похибка розрахунків за формулою для всіх трьох реакторів була менша 30%. Із збільшенням потоку кисню в діапазоні 3–10 л/хв ця похибка зменшується до 10%. Характеристики реакторів, що працювали впродовж згаданого вище часу, практично не змінювалися. Це вказує на досить високу стабільність генерації озону реакторами з багатокоронними розрядами.

Оскільки дані реактори працювали без примусового охолодження, то температура їх зовнішньої поверхні при максимальному робочому струмі досягала 80–90 °С, при цьому помітної зміни концентрації озону не було виявлено. Це пояснюється слабкою взаємодією озону із стінками реактора та електродами. Крім того, при додаткових вимірюваннях температури газу в камері встановлено, що вона не перевищувала 40 °С.

## Висновки

Експериментальні дослідження різних варіантів електродних систем плазмових реакто-

рів багатокоронного розряду з вторинними емітерами електронів для генерації озону показали, що основними факторами впливу на його концентрацію є загальний струм розряду та потік кисню через реактор. Встановлено, що вихідна концентрація озону  $C$  прямо пропорційна струму та обернено пропорційна потоку  $Q$  в степені  $m$ , де  $m < 1$ . Тип конструкції реактора практично не впливає на ефективність генерації озону, хоча дещо вищі значення його концентрації при однакових умовах отримані для електродних системи з проволочками порівняно з голковими системами. Тип електродної системи та її геометрія визначають здебільшого

електричні характеристики коронного розряду в ній. Для реального використання при виборі типу системи та її геометрії слід виходити з умов забезпечення необхідного розрядного струму при мінімально можливій напрузі на електродах та заданій продуктивності реактора по озону.

У подальшому бажано провести більш глибоке дослідження електричних режимів живлення багатокоронних електродних систем з метою підвищення продуктивності реактора по озону, а також роботи реакторів у різних газових середовищах.

В.И. Крижановский, А.И. Кузьмичев,  
Р.Ю. Чаплинский

ПЛАЗМОВЫЕ РЕАКТОРЫ ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ  
ОЗОНА НА КОРОННОМ РАЗРЯДЕ С ВТОРИЧ-  
НЫМИ ЭМИТТЕРАМИ ЭЛЕКТРОНОВ

Проведены исследования разных по конструкции электродных систем плазмохимических реакторов на бесстримерном коронном разряде с вторичными эмиттерами электронов и определены их эффективности по генерации озона. Найдена эмпирическая зависимость между выходной концентрацией озона  $C$ , током разряда  $I$  и потоком кислорода  $Q$  для реакторов с игольчатыми электродами.

V.I. Krushchanovskiy, A.I. Kuzmichev,  
R.Yu. Chaplinskiy

PLASMA REACTORS FOR OZONE GENERATION  
ON CORONA DISCHARGE WITH SECONDARY  
ELECTRON EMITTERS

We study various constructions of electrode systems of plasma-chemical reactors on the non-streamer corona discharge with secondary electron emitters. We also aim at determining the efficiency of ozone generation. Finally, we establish the empirical dependence of  $C$  initial ozone concentration,  $I$  current of multicorona discharge and  $Q$  oxygen stream for reactors with needle electrodes.

1. Драгинский В.Л., Алексеева Л.П., Самойлович В.Г. Озонирование в процессах очистки воды. — М.: ДеЛи принт, 2007. — 400 с.
2. Крижановский В.И., Кузьмичев А.И., Циделко В.Д. Техника и технология озонотерапии // Укр. журн. мед. техніки і технологій. — 1994. — № 1-2. — С. 22–23.
3. Лунин В.В., Попович М.П., Ткаченко С.Н. Физическая химия озона. — М.: Изд-во МГУ, 1998. — 466 с.
4. Верецагин И.П. Коронный разряд в аппаратах электронно-ионной технологии. — М.: Энергоатомиздат, 1985. — 160 с.
5. Самойлович В.Г., Гибалов В.И., Козлов К.В. Физическая химия барьерного разряда. — М.: Изд-во МГУ, 1989. — 176 с.
6. Крижановский В.И., Кузьмичев А.И. Воспроизводимость генерации озона в коронном разряде с острийными электродами // Изв. РАН. Сер. физическая. — 2000. — 6, № 7. — С. 1301–1306.
7. Pekárek S. Two Hollow Needles-to-Plate Electrical Discharge at Atmospheric Pressure // 27<sup>th</sup> EPS Conference on Contr. Fusion and Plasma Phys. — Budapest, 2000. — 24. — P. 472–475.