

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені В. Н. КАРАЗІНА

ПУГАЧ СЕРГІЙ ГРИГОРОВИЧ

УДК: 533.9

**«ВПЛИВ ЕЛЕКТРОНЕГАТИВНИХ ДОМІШОК НА ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНІ
ХАРАКТЕРИСТИКИ ТА СИНТЕЗ ОЗОНУ В БЕЗБАР'ЄРНОМУ РОЗРЯДІ З
КОНФІГУРАЦІЄЮ ЕЛЕКТРОДІВ ГОЛКА-ПЛОЩИНА»**

01.04.08 – фізика плазми

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Харків – 2024

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті плазмової електроніки та нових методів прискорювання Національного наукового центру «Харківський фізико-технічний інститут» Національної академії наук України.

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук, професор, академік НАН України **Гаркуша Ігор Євгенійович**, Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут», заступник генерального директора з наукової роботи.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор, **Веклич Анатолій Миколайович**, Київський національний університет імені Тараса Шевченка МОН України, завідувач кафедри фізичної електроніки;

доктор фізико-математичних наук, Старший науковий співробітник, **Лісовський Валерій Олександрович**, Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна МОН України, професор кафедри матеріалів реакторобудування та фізичних технологій.

Захист відбудеться “27” вересня 2024 р. о 15-00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.051.12 Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна МОН України за адресою: 61022, м. Харків, майдан Свободи, 4, Безпечне середовище.

З дисертацією можна ознайомитись у Центральній науковій бібліотеці Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна за адресою: 61022, м. Харків, майдан Свободи, 4

Автореферат розіслано “___” серпня 2024 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої
ради Д 64.051.12



Андрій ГАХ

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Низькотемпературна нерівноважна плазма газового розряду в молекулярних газах має широке застосування за рахунок різноманіття хімічних реакцій, які стають можливими за наявності у розряді заряджених та збуджених частинок, випромінювання розряду та призводять до синтезу корисних речовин та розпаду забруднюючих сполук. Це є причиною сталого інтересу до дослідження електричних, електродинамічних, спектроскопічних характеристик та динаміки випромінювання, кінетики й виходу корисних речовин за низькотемпературного нерівноважного газового розряду. Безбар'єрний розряд атмосферного тиску у кисневмісних газах є одним з видів низькотемпературного газового розряду, в якому відтворюються умови для нерівноважної плазмохімії, зокрема для електросинтезу озону, природнього окиснювача, що використовується в багатьох секторах економіки. Безбар'єрний розряд є перспективною альтернативою для традиційного способу генерації озону за допомогою бар'єрного розряду. Дослідження безбар'єрного розряду є актуальними для втілення сучасної довгострокової стратегії екологічно дружнього розвитку суспільства та створення новітніх сприятливих до довкілля технологій.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконувалася в межах виконання державних планових науково-дослідних робіт і програм за наступними темами: (ІПЕНМП) № 03/65.63 «Теоретичні та експериментальні дослідження плазмо-хімічних процесів в тліючому розряді та застосування озонових технологій» (2001-2002); (ІПЕНМП) №080901UP0009 «Розробка нерівноважних плазмохімічних реакторів і їх застосування для екологічно чистих технологій» (2003-2005), (ІПЕНМП) №26 «Дослідження електродинамічних та спектрометричних характеристик і кінетики плазмохімічних реакцій в умовах газових розрядів (2006-2010); (ІПЕНМП) №0111U009557 «Теоретичні та експериментальні дослідження газових розрядів у безбар'єрних плазмохімічних реакторах, розробка нових плазмохімічних технологій обробки газів» (2011-2015); (ІПЕНМП) №0116U006488 «Дослідження газових розрядів з сильно неоднорідним розподілом електричного поля. Технологічні застосування безбар'єрних плазмохімічних реакторів» (2016-2020). Роль автора дисертації у роботах – виконавець.

Також результати, що становлять основу дисертації, мають актуальність у міжнародній науково-дослідній та інноваційній діяльності та були отримані за наступними міжнародними проєктами: УНТЦ 1971 «Очищення води від патогенних мікроорганізмів та лікарських сполук при спільному впливу озону та високоенергетичного електронного пучка», УНТЦ 2144 «Розробка нових екологічно чистих технологічних методів передпосівної обробки насіння зернових культур озонופовітряною сумішшю», УНТЦ P658 «Розробка вискоєфективних систем обробки води», Horizon 2020 GA 678781 Mycokey, CRDF #UPO-11019-PNNL, CRDF #UKP2-9076-KH-12.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є визначення впливу електронегативних домішок на режими й характеристики безбар'єрного газового розряду атмосферного тиску у N_2 - O_2 сумішах в системі електродів голка – площа

за різної полярності потенціалу на вістрійному електроді та на механізми й ефективність синтезу озону в умовах низькотемпературної нерівноважної плазмохімії за різних режимів безбар'єрного газового розряду.

Для досягнення поставленої мети було необхідно вирішити наступні завдання:

1. Провести на основі літературних даних аналіз сучасного стану досліджень розряду атмосферного тиску в системі електродів голка – площа та дослідження синтезу озону в розряді атмосферного тиску.
2. Розробити та виготовити експериментальні стенди для дослідження електричних та електродинамічних параметрів газового розряду, вивчення випромінювання газового розряду та електросинтезу озону у газовому розряді за умов використання електронегативних домішок у робочому газі.
3. Відпрацювати методику аналізу електродинамічних, спектрометричних параметрів розряду й ефективності синтезу озону.
4. Визначити електричні, електродинамічні параметри розряду в системі електродів голка – площа за позитивної та негативної полярності потенціалу на вістрійному електроді.
5. Провести дослідження із впливу електронегативних домішок на електричні, електродинамічні, спектрометричні характеристики розряду в системі електродів голка – площа та синтезу озону за позитивної та негативної полярності на вістрі.
6. Дослідити особливості електросинтезу озону при постійному та імпульсному живленні в системі електродів голка – площа.
7. Провести порівняльний аналіз ефективності синтезу озону за різних умов живлення та різних режимів розряду в системі голка – площа при позитивній та негативній полярності постійного потенціалу на вістрійному електроді.

Об'єкт дослідження. Низькотемпературна нерівноважна плазма безбар'єрного газового розряду атмосферного тиску у N_2 - O_2 сумішах з домішками електронегативних газів.

Предмет дослідження. Електричні, електродинамічні, спектрометричні характеристики газового розряду атмосферного тиску та синтезу озону в системі електродів голка площа за різної полярності на вістрійному електроді.

Методи дослідження.

В роботі використовуються відомі фізичні методи аналізу електричних та електродинамічних параметрів газового розряду, спектрометрія газового розряду у видимому спектрі випромінювання, оптичний метод вимірювання концентрації озону синтезованого газовим розрядом, комп'ютерні методи обробки експериментальних даних.

Наукова новизна одержаних результатів.

Наукова новизна отриманих результатів дисертаційної роботи полягає в тому, що в ній вперше:

1. Показана кореляція між наявністю умов для дисоціативного прилипання електронів до електронегативних газів в N_2 - O_2 сумішах й зміною ВАХ та електродинамічних характеристик в чотирьох режимах розряду в електродній конфігурації голка-площа.

2. Доведено, що вплив електронегативних домішок в N_2-O_2 сумішах на ВАХ режиму нестационарного струму позитивної полярності в електродній конфігурації голка-площина, обумовлений динамікою імпульсної складової розрядного струму, внесок якої зменшується із зростанням концентрації електронегативних домішок в N_2-O_2 суміші.

3. Показано, що поведінка постійної складової струму нестационарного режиму позитивної полярності в електродній конфігурації голка-площина є аналогічною до режиму розряду із стаціонарним струмом за позитивної полярності. Збільшення частки електронегативних домішок в N_2-O_2 сумішах фактично не змінює ВАХ, як постійної складової струму нестационарного режиму позитивної полярності, так і ВАХ режиму стаціонарного струму позитивної полярності в електродній конфігурації голка-площина.

4. Встановлено, що енерговитрати на постійну складову розрядного струму, що визначається наявним дрейфом іонів, не впливають на динаміку синтезу озону за режиму нестационарного струму позитивної полярності в електродній конфігурації голка-площина. Зменшення внеску постійної складової струму за рахунок імпульсного живлення збільшує ефективність синтезу озону у 3÷4 рази у порівнянні з режимом розряду за постійного живлення.

5. Показано, що більш ефективний синтез озону спостерігається в режимах, в яких наявні умови для дисоціативного прилипання електронів до молекул кисню. Здійснено градацію від найбільш ефективного режиму, яким є режим нестационарного струму позитивної полярності з розповсюдженням первинних стримерів, що замикають розрядний проміжок та подальшим розповсюдженням вторинних стримерів, другим є режим негативної полярності, третім є режим нестационарного струму позитивної полярності з розповсюдженням первинних стримерів, що не досягають катоду. Найменш ефективним режимом розряду є стаціонарний режим позитивної полярності, в якому не спостерігаються умови для дисоціативного прилипання електронів.

Практичне значення одержаних результатів. Результати досліджень становлять фізичну основу для створення плазмохімічних реакторів на базі безбар'єрного газового розряду для розвитку промислових генераторів озону. За результатами досліджень розроблено плазмохімічну систему для обробки сільськогосподарських культур. Продemonстровано вплив озону на зниження мікробіологічного грибкового зараження зернових культур. Запропоновано режими обробки озono-повітряною сумішшю для контролю грибової контамінації при зберіганні зернових культур. Запропоновано спосіб передпосівної обробки часнику озоном та отримано патент на корисну модель.

Публікації. Результати дисертаційної роботи повністю відображено у 20 наукових працях, серед яких 6 статей опубліковано в спеціалізованих виданнях України, які включено в міжнародні наукометричні бази Scopus і Web of Science [1-6], 1 стаття опублікована у зарубіжному спеціалізованому виданні, яку включено в міжнародні наукометричні бази Scopus і Web of Science [7], 13 робіт опубліковано в матеріалах і тезах доповідей на наукових конференціях [8-20].

Особистий внесок здобувача.

Автором особисто отримані всі результати, що представлені в дисертації. При підготовці та проведенні експериментів, аналізі результатів, формулюванні висновків, підготовці наукових публікацій за результатами досліджень внесок автора був визначальним. Автору дисертації належить також постановка завдань експериментальних досліджень та вибір наукових підходів до їх вирішення.

В роботі [1] автором проведено експериментальне дослідження нестационарної стадії розряду в системі електродів голка-площина при позитивній полярності на голчастому електроді. Встановлені основні режими розряду, ВАХ та електродинамічні параметри розряду в залежності від розрядного проміжку та напруги між електродами. Введене поняття постійної та імпульсної складової розрядного струму при нестационарному режимі, що живиться за постійної напруги на розрядному проміжку.

В роботі [2а, 10] автором проведено експериментальне дослідження газового розряду в системі електродів голка-площина при позитивному та негативному потенціалі на вістрі з реєстрацією випромінювання розряду. Показано, що співвідношення інтенсивності випромінювання пов'язаного з атомарним киснем $I_{(NO-\gamma(0-1))}/I_{(IV+N_2(0-1))}$ та $I_{(O(777,1nm))}/I_{(II+N_2(0-3))}$ в режимі стаціонарного струму позитивної полярності є на порядок меншим у порівнянні з нестационарним режимом струму за позитивної полярності та режимом розряду за негативної полярності на вістрі.

В роботах [2б, 11, 12] здобувачем проведено експериментальне дослідження динаміки струму та динаміки випромінювання розряду вздовж розрядного проміжку у випадку нестационарної стадії розряду в системі голка – площина при позитивному потенціалі на голчастому електроді. Визначено ВАХ розряду, яку можна розбити на 5 ділянок, що характеризуються різними електродинамічними характеристиками та динамікою випромінювання вздовж розрядного проміжку, а також процесами у розрядному проміжку.

В роботах [3а, 8, 14] автором проведено експериментальні дослідження ВАХ розряду в системі електродів голка – площина при позитивному та негативному потенціалі на вістрі з домішками електронегативних газів (кисню, озону та пари води). Встановлено відсутність впливу електронегативних домішок на режим розряду із стаціонарним струмом при позитивній полярності на відміну від режимів нестационарного протікання струму при позитивній полярності та режиму розряду при негативній полярності на вістрі. Запропоноване пояснення у відмінності впливу електронегативних домішок між різними режимами розряду.

В роботах [3б, 9, 13] автором проведено експериментальні дослідження синтезу озону в системі електродів голка-площина при позитивному потенціалі на вістрійному електроді за імпульсного живлення електродної системи. Встановлено, що більш ефективним живленням є імпульсне живлення з довжиною імпульса близьким до тривалості проходження стримерів, що дозволяє скоротити вплив постійної складової розрядного струму у загальний енергетичний баланс та зменшити внесок постійної складової до енерговитрат на синтез озону.

В роботах [4-6, 15-20] автором здійснені прикладні дослідження у використанні озону для грибкової деконтамінації зернових культур та часнику. Встановлено інгібіруючий вплив озону на розвиток грибкової інфекції *Aspergillus flavus* і *Penicillium nordicum* та здатність озono-повітряної суміші пригнічувати розвиток плісневих грибів на зернових культурах та насінні соняшнику під час їх зберігання. Продemonстрована ефективність озонових технологій для великомасштабного зберігання зерна, а також для зниження грибкового зараження і контролю вмісту мікотоксинів у продовольчому зерні. Показано позитивний вплив обробки озono-повітряною на врожайність часнику.

В роботі [7] автором проведені експериментальні дослідження електродинамічних характеристик розряду та синтезу озону в системі електродів голка площа при позитивному та негативному потенціалі на вістрійному електроді в електронегативних газах з різним вмістом N_2-O_2 . Встановлено значний вплив кисню на імпульсну складову розрядного струму та відсутність суттєвого впливу на постійну складову нестационарного режиму позитивної полярності, показано спорідненість поведінки синтезу озону від вкладеної потужності за нестационарного режиму та поведінки імпульсної складової розрядного струму за позитивної полярності. Продemonстровано різницю в ефективності синтезу озону між різними режимами розряду в системі електродів голка площа при позитивному та негативному потенціалі на вістрійному електроді та кореляція синтезу озону із наявністю в розряді можливостей для дисоціативного прилипання електронів до молекули кисню.

Апробація результатів дисертації. Зміст та висновки дисертаційної роботи викладені й обговорені на 11 міжнародних конференціях: 10 International conference on plasma physics and controlled fusion, 13-18 September, 2004; 16 International Symposium on Plasmachemistry, June 22-27, 2003, Taormina, Italy; International Conference on Plasma of Low Temperature, 11-15 May, 2003, Kiev, Ukraine; 26 th International Conference on Phenomena in Ionized Gases, Greifswald, Germany on 15-20 July 2003; II International conference “Electronics and applied physics”, 11-14 October, 2006, Kyiv, Ukraine; 13th International Congress on Plasma Physics, 22-26 May, 2006, Kiev, Ukraine; 13th European fusarium seminar, 10-14 May, 2015, Martina Franca, Italy; 1st Mycokey Conference, September 2017, Ghent, Belgium; International scientific and practical conference “Fundamental and applied problems of modern ecology and plant protection“, 14-15 September, 2017, Kharkiv, Ukraine; XVI міжнародної конференції *Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення*, м. Харків, Україна, 13-18 вересня, 2020; VII International Scientific and Practical Conference, Kyoto, Japan, 1-3 April 2021.

Також зміст та висновки дисертаційної роботи обговорювались на багатьох наукових семінарах та науково-технічних радах Інституту плазмової електроніки та нових методів прискорення Національного наукового центру «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел і одного додатку. Загальний обсяг дисертації складає 175 сторінок, з яких основний текст – 127 сторінок. Робота містить 58 рисунків та 14 таблиць. Список використаних джерел налічує 191 найменування.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У дисертаційній роботі представлено експериментальні дослідження низькотемпературної нерівноважної плазми безбар'єрного розряду атмосферного тиску в системі електродів голка-площина у кисневмісних газах та результати впливу електронегативних домішок на електричні, електродинамічні характеристики та випромінювання за чотирьох режимів розряду та порівняння умов дисоціативного прилипання електронів до молекули кисню й синтезу озону за різних режимів позитивної та негативної полярності потенціалу на вістрійному електроді.

У **вступі** обґрунтовано важливість та актуальність теми дисертаційної роботи і досліджень низькотемпературної нерівноважної плазми безбар'єрного розряду атмосферного тиску, сформульовано мету та основні завдання роботи, відображено зв'язок дисертаційної роботи з науковими програмами й темами, що виконуються в Інституті плазмової електроніки та нових методів прискорювання ННЦ ХФТІ НАН України, наведено дані про наукову новизну отриманих результатів та їх практичне значення, зазначено особистий внесок здобувача в наукових працях, надано відомості про апробацію результатів роботи та публікації за темою дисертації.

У **першому** розділі коротко описано сучасний стан досліджень безбар'єрного газового розряду атмосферного тиску за позитивної та негативної полярності в електродних конфігураціях з різко неоднорідним електричним полем. Наведено методи вимірювання та діагностики розряду, представлено розроблені експериментальні стенди, на яких виконувалися дослідження наведені в дисертаційній роботі. Наведено результати експериментальних досліджень безбар'єрного розряду в повітрі атмосферного тиску в системі електродів голка-площина за позитивної полярності на вістрі.

Представлено розрядний струм нестационарного режиму розряду, як суму постійної та імпульсної складової струму, в якій під постійною складовою струму розуміється струм, що протікає між двома послідовними імпульсами. Імпульсний струм визначається зарядом, що протікає за час поширення первинного та вторинного стримерів через розрядний проміжок у кожен період повторення імпульсів струму $\tau_{\text{сл}}$. Показано, що постійна складова розрядного струму, обумовлена іонним дрейфом при розпаді об'ємного заряду стримерного каналу. За розпаду об'ємного заряду стримерного каналу, відновлюються умови для формування наступного, таким чином процес проходження стримерів відбувається із періодичністю. Для повітря характерним часом повторення є 100 мкс. На Рис. 1 наведено частоту слідування імпульсів струму, та залежність швидкості дрейфу іонів як $v \sim h/\tau_{\text{сл}} = 10^4$ см/с від напруженості електричного поля $E=U/h$, (h – розрядний проміжок, $\tau_{\text{сл}}$ – період слідування імпульсів струму, U – напруга, що прикладена до розрядного проміжку). Показано, що в області значень напруженості електричного поля, що реалізуються в експериментах, залежність має лінійний характер, що свідчить про сталість усередненої рухливості іонів по проміжку. Тобто дрейф іонів має електричну природу й відомо, що визначається як $v_{\text{др}} = \mu_i E$, де E – напруженість електричного поля, μ_i – рухливість іонів.

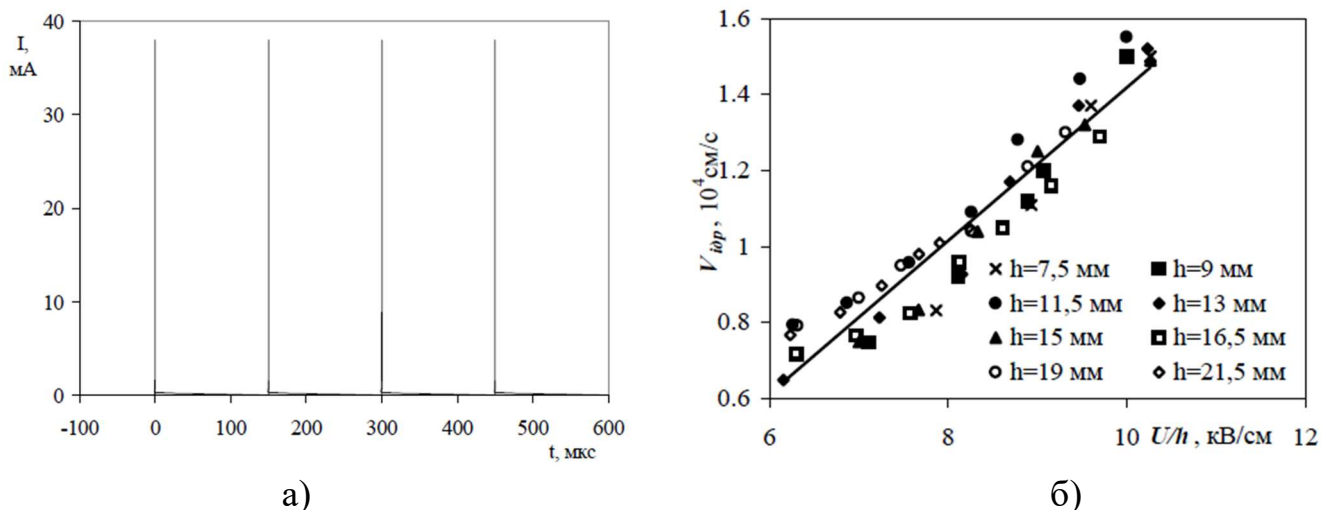


Рис. 1 (а) - частота слідування квазіперіодичних імпульсів струму при позитивному потенціалі на вістрі в повітрі; (б) - залежність швидкості дрейфу іонів ($h/\tau_{\text{сл}}$) від середньої напруженості електричного поля у проміжку U/h .

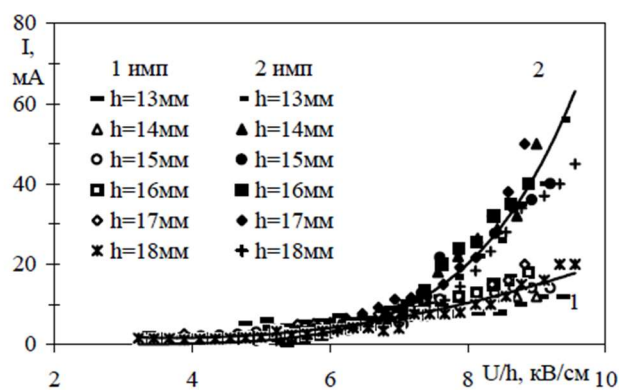


Рис. 2 Амплітуди першого та другого максимуму імпульсу струму від U/h .

Показано, що імпульсна складова змінюються за двома різними закономірностями залежно від напруги на міжелектродному проміжку (Рис. 2), що є наслідками різних механізмів перенесення струму та пов'язані з розповсюдженням первинного стримеру, що замикає проміжок на початкових напругах та закономірності зростання струму, що пов'язана з розповсюдженням вторинного стримера після замикання проміжку первинним стримером.

ВАХ безбар'єрного розряду атмосферного тиску в системі голка – площина представлено п'ятьма різними режимами, що відрізняються між собою електричними, електродинамічними характеристиками та випромінюванням розряду, три з яких більш детально розглядаються в наступних розділах дисертаційної роботи.

Основні результати Розділу 1 опубліковані в роботах [1, 2б] та доповідалися на конференціях [11, 12]

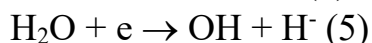
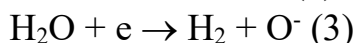
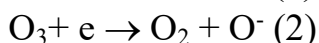
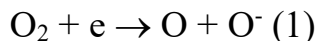
У другому розділі представлено експериментальні дослідження, в яких вперше порівняно вплив електронегативних газів, що є типовими у випадку генерації озону

за допомогою низькотемпературної нерівноважної плазми газового розряду атмосферного тиску (кисень, пари води та озон) на характеристики чотирьох режимів розряду за позитивної та негативної полярності постійної напруги, прикладеної до електродної конфігурації типу голка-площина:

- стаціонарний режим струму позитивної полярності (СПП);
- нестаціонарний режим струму з розповсюдженням первинних стримерів, що не досягають катоду НСПП (PS);
- нестаціонарний режим струму з розповсюдженням первинних стримерів замикаючих розрядний проміжок та подальшим розповсюдженням вторинних стримерів НСПП (PS/SS);
- режим розряду за негативної полярності (НП).

Показано, що вплив електронегативних домішок на електричні та електродинамічні характеристики чотирьох режимів пов'язаний з наявністю або відсутністю в низькотемпературній нерівноважній плазмі розрядного каналу сприятливих умов для процесів дисоціативного прилипання електронів до електронегативних газів. Такі умови є наявними за режимів НП, НСПП (PS), НСПП (PS/SS), в яких спостерігається вплив електронегативних домішок. В режимі СПП відсутні умови для утворення негативних іонів та не спостерігається впливу електронегативних домішок на ВАХ режиму розряду СПП.

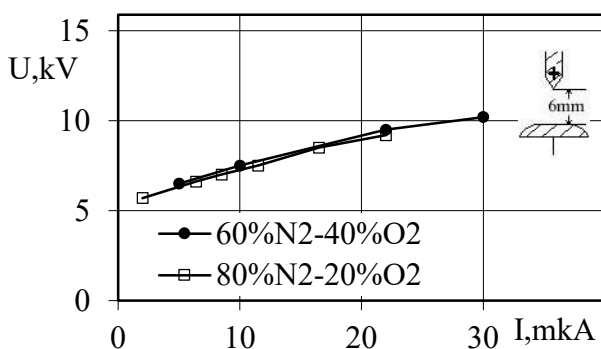
В умовах низькотемпературної нерівноважної плазми газового розряду голка – площина в повітрі, азотно-кисневих сумішах виникає двох-часткові та трьох-часткові реакції формування негативних іонів в реакціях з електронами, які зменшують електронну провідність розрядного проміжку. Двох-часткові реакції утворення негативних іонів при взаємодії з електронами, тобто реакції дисоціативного прилипання (1-5):



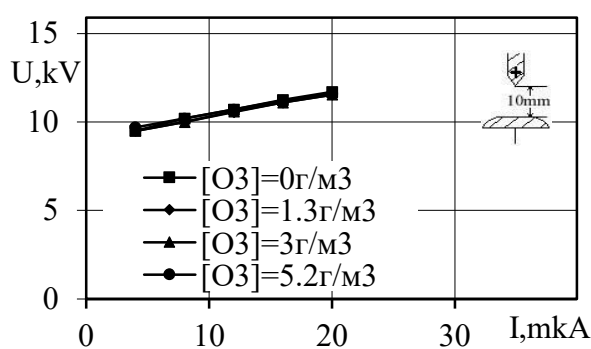
є основним джерелом утворення первинних негативних іонів у розряді атмосферного тиску. Саме реакції дисоціативного прилипання впливають на зменшення електронної провідності розряду в умовах низькотемпературної нерівноважної плазми газового розряду голка – площина в повітрі.

Розглянуто основні фізичні процеси стаціонарного режиму струму за позитивної полярності та режиму за негативної полярності на вістрійному електроді. Відмінність в розвитку лавинних процесів в іонізаційній зоні (в бік збільшення електричного поля у випадку СПП та в бік зменшення електричного поля у випадку НП) дає різну густину електронів на межі зони іонізації та зони дрейфу іонів (мінімальна густина в режимі СПП та максимальна густина в режимі НП). Режим НП має максимальну густину електронів в зоні, в якій домінують процеси прилипання електронів та відповідно утворюються негативні іони. Наведена відмінність у фізичних процесах пояснює отримані у дослідженнях результати щодо відсутності впливу

електронегативних домішок на режим стаціонарного струму позитивної полярності (Рис. 3) та суттєвий вплив електронегативних газів на режим розряду за негативної полярності (Рис. 4).

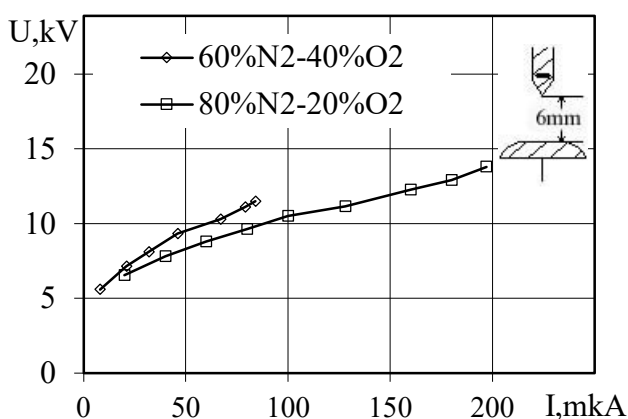


а)

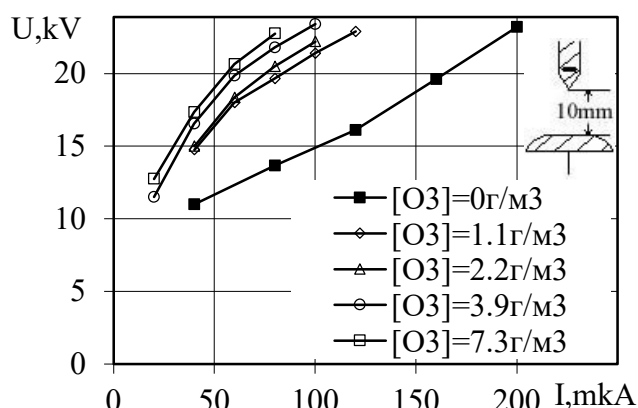


б)

Рис. 3 (а) - ВАХ у режимі постійного протікання струму при позитивному потенціалі на голчастому електроді: газові суміші 20%O₂+80%N₂, 40%O₂+60%N₂, (d = 6 мм, 0.6 л/хв.); (б) - ВАХ в режимі постійного протікання струму при позитивному потенціалі на голчастому електроді в повітрі з добавкою озону (d = 10 мм, витрата газу 0.6 л/хв.)



а)



б)

Рис. 4 (а) - ВАХ в режимах НП: газові суміші 20%O₂+80%N₂, 40%O₂+60%N₂, (d = 6 мм, 0.6 л/хв.); (б) - ВАХ у режимах НП у суміш повітря з озonom (d = 10 мм, витрата газу 0.6 л/хв.)

Показано суттєвий вплив електронегативних домішок (кисню та озону) на ВАХ нестационарного режиму струму за позитивної полярності на вістрі (режими НСПП (PS), НСПП (PS/SS)).

В роботі продемонстровано, що імпульсна складова розрядного струму є відповідальною за зміну ВАХ при додаванні електронегативних домішок, в той час як постійна складова розрядного струму практично не змінюється (Рис. 5, 6). Вплив електронегативних газів на імпульсну складову пов'язаний з процесами дисоціативного прилипання електронів в каналі первинного та вторинного стримерів. Утворення негативних іонів в процесах прилипання електронів призводить до більш

швидкої деградації первинного стримера та збільшення напруги на проміжку газового розряду, за якої первинний стример досягає катоду й спостерігається подальше розповсюдження вторинного стримера. Відповідно, за умов збільшення кількості електронегативних домішок в робочому газі розряду, необхідні більші енергетичні витрати для отримання режиму НСПП (PS/SS), коли первинний стример замикає розрядний проміжок та спостерігається подальше розповсюдження вторинного стримера. Показано, що додавання електронегативних домішок призводить до зменшення імпульсної складової розрядного струму та збільшення внеску постійної складової розрядного струму в енергетичний баланс нестационарного режиму безбар'єрного розряду в системі електродів голка-площина.

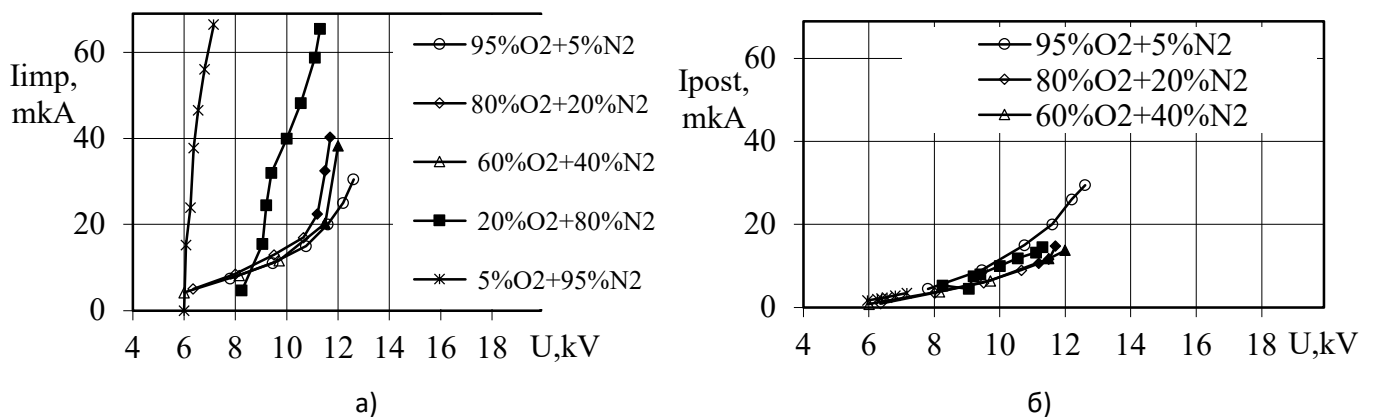


Рис. 5 Залежність імпульсної (а) та постійної (б) складових середнього струму від напруги, прикладеного до проміжку для різних N₂-O₂ сумішей. (d=10mm, витрати газу - 0.6 л/хв.)

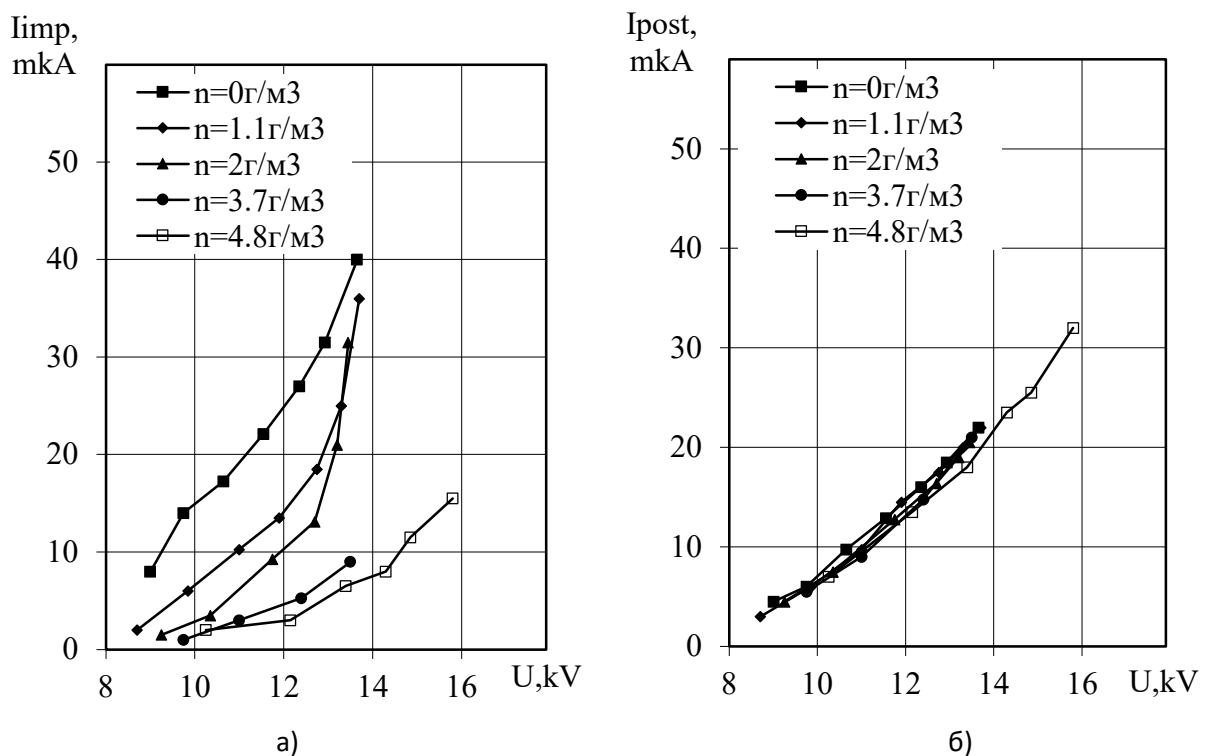


Рис. 6 Залежність імпульсної складової середнього струму (а) та постійної складової середнього струму (б) від прикладеної напруги в електродній системі голка-площина при різному вмісті озону в озono-повітряній суміші.

Основні результати Розділу 2 опубліковані в роботах [3а, 7] та доповідалися на конференціях [8, 10, 14].

У **третьому** розділі представлено експериментальне дослідження ефективності синтезу озону, в яких вперше порівняно синтез озону та вплив електронегативних домішок в чотирьох режимах розряду за позитивної та негативної полярності постійної напруги, прикладеної до електродної конфігурації типу голка-площина: режими СПП, НСПП (PS), НСПП (PS/SS) та НП.

Показано, що синтез озону в різних режимах безбар'єрного газового розряду корелює з наявністю умов для процесів дисоціативного прилипання електронів до молекули кисню. Режим СПП, в якому не спостерігається умов для дисоціативного прилипання електронів, має в 10 – 100 разів меншу ефективність синтезу озону у порівнянні з іншими режимами. Імпульсна складова потужності розряду в режимах НСПП (PS), НСПП (PS/SS), тобто складова обумовлена процесами розповсюдження первинних та вторинних стримерів є відповідальною за ефективність напрацювання озону. Виключення постійної складової потужності розряду в режимах НСПП (PS), НСПП (PS/SS) не призводить до зміни поведінки залежності концентрації озону від потужності (Рис. 7). Відповідно ці процеси є не ефективними для синтезу озону та зменшення впливу витрат на відновлення умов для наступного імпульсу струму (проходження первинного та вторинного стримеру) буде покращувати енергоефективність синтезу озону в розряді.

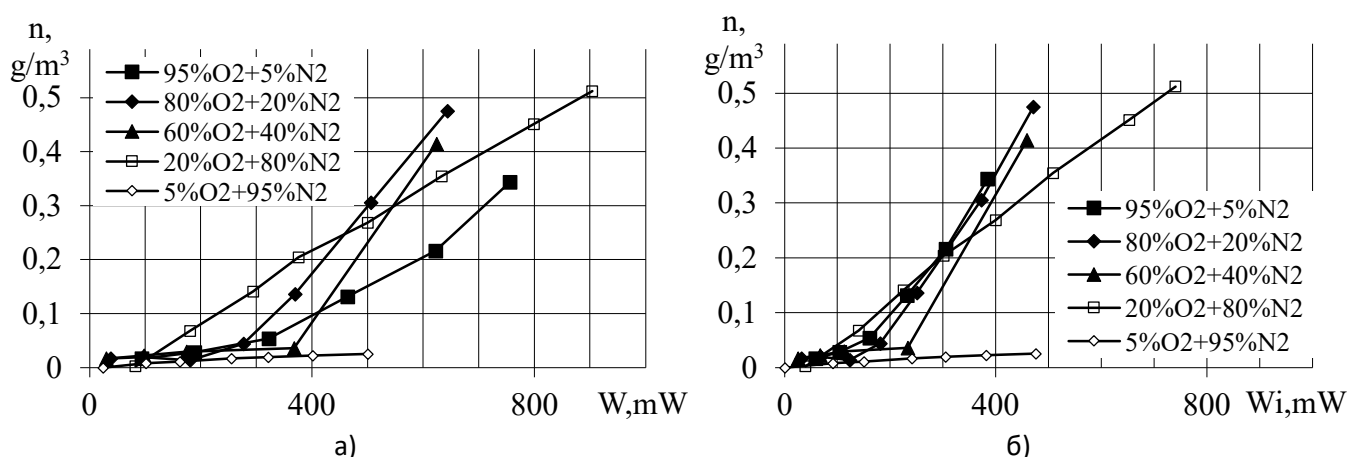


Рис. 7 (а) - залежність концентрації озону, синтезованого у розряді від вкладеної в розряд потужності; (б) - залежність концентрації озону, синтезованої у розряді, від імпульсної складової потужності для різних N_2 - O_2 сумішей ($d=10$ мм, витрата газу 0,6л/хв.) за нестационарного режиму розряду при позитивній полярності потенціалу на гострому електроді.

Показано вплив електронегативних домішок на ефективність синтезу озону у розряді, що пов'язаний із зміщенням переходу від режиму НСПП PS до режиму НСПП PS/SS в бік більш високої напруги й відповідно до зростання внеску постійної складової розрядного струму в енергетичний баланс розряду, що зменшує ефективність синтезу озону. Це спостерігається за начального діапазону напруги, де ефективність синтезу озону у N_2 - O_2 суміші з 20% кисню, більше ніж у N_2 - O_2 сумішах з

більшим вмістом кисню. Порівняння ефективності синтезу озону в залежності від зростання вмісту O_2 в суміші N_2 - O_2 лише для режиму НСПП PS або лише в режимі НСПП PS/SS демонструє зростання ефективності синтезу озону із зростанням вмісту O_2 .

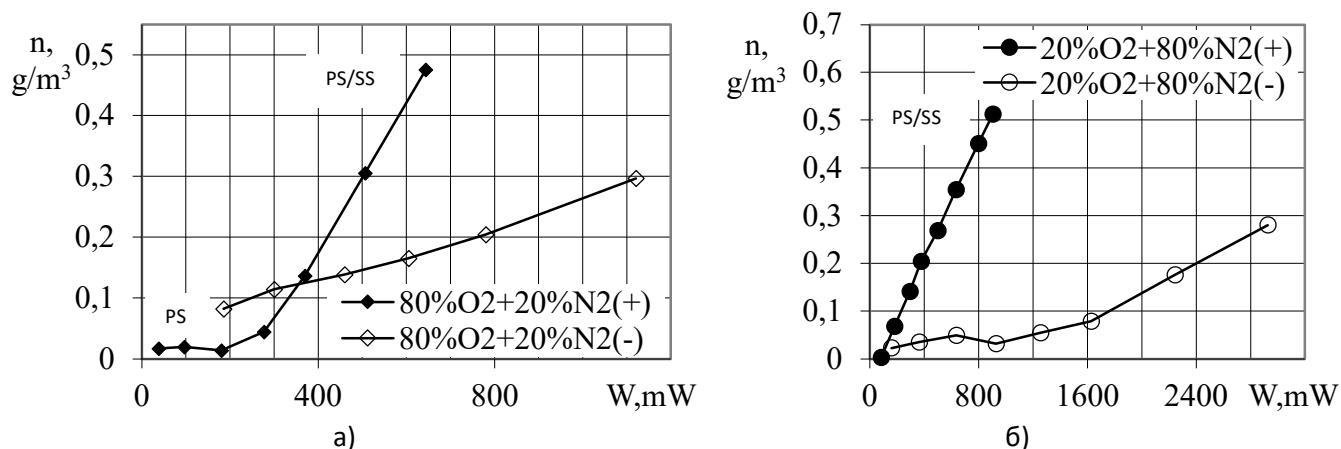


Рис. 8 Залежність концентрації озону від вкладеної в розряд потужності за негативної та позитивної полярності потенціалу на вістрі за різних N_2 - O_2 сумішей ($d=10$ мм).

Показано, що умови стаціонарного режиму розряду за позитивної полярності є не ефективними для синтезу озону (формування атомарного кисню в процесах дисоціативного прилипання електронів) й формування негативних іонів в процесах дисоціативного прилипання електронів до електронегативних газів. З іншого боку, умови стаціонарного розряду позитивної полярності є більш придатними для інших двох основних каналів дисоціації молекулярного кисню - це ударна дисоціація та фотодисоціація. Також ударна дисоціація та фотодисоціація кисню може відбуватися в умовах фронту первинного стримера або прикатодної області під час розповсюдження вторинного стримера, в яких приведені електричні поля є порівняними з полем біля вістря. Низький рівень ефективності синтезу озону в режимі СПП може свідчити про домінування дисоціативного прилипання над ударною дисоціацією та фотодисоціацією у генерації атомарного кисню в плазмохімічних реакціях безбар'єрного розряду атмосферного тиску.

Проведено порівняльний аналіз ефективності синтезу озону в чотирьох різних режимах безбар'єрного газового розряду в системі електродів голка-площина (Рис. 7, 8), який дозволяє ранкувати їх за ефективністю від найбільш ефективного режиму до найменш ефективного режиму розряду: (i) - НСПП (PS/SS), (ii) - НП, (iii) - НСПП (PS), (iv) - СПП.

Основні результати Розділу 3 опубліковані в роботах [2а, 2б, 3а, 7] та доповідалися на конференціях [8, 10, 11, 12, 14].

У **четвертому** розділі показано результати експериментального дослідження синтезу озону в системі електродів багато голок-площина при імпульсному живленні за позитивної полярності потенціалу на вістрі. В якості характеристик імпульсного

живлення було відібрано два режими: (i) - перший режим живлення з коротким імпульсом напруги (short - 300 нс), який симулює умови, за яких напруга присутня протягом проходження первинного, вторинного стримерів та відсутня в часі характерному для дрейфу іонів між двома послідовними імпульсами струму за постійної напруги; (ii) – другий режим живлення з довгим імпульсом напруги (long - 20 мс), який імітує умови постійної напруги на розрядному проміжку, тобто напруга присутня протягом часу, що є більшим ніж час між двома послідовними імпульсами струму нестационарного режиму позитивної полярності (час за який відбуваються процеси формування та проходження первинного, вторинного стримерів та дрейф іонів для відновлення умов та формування наступного циклу проходження стримерів).

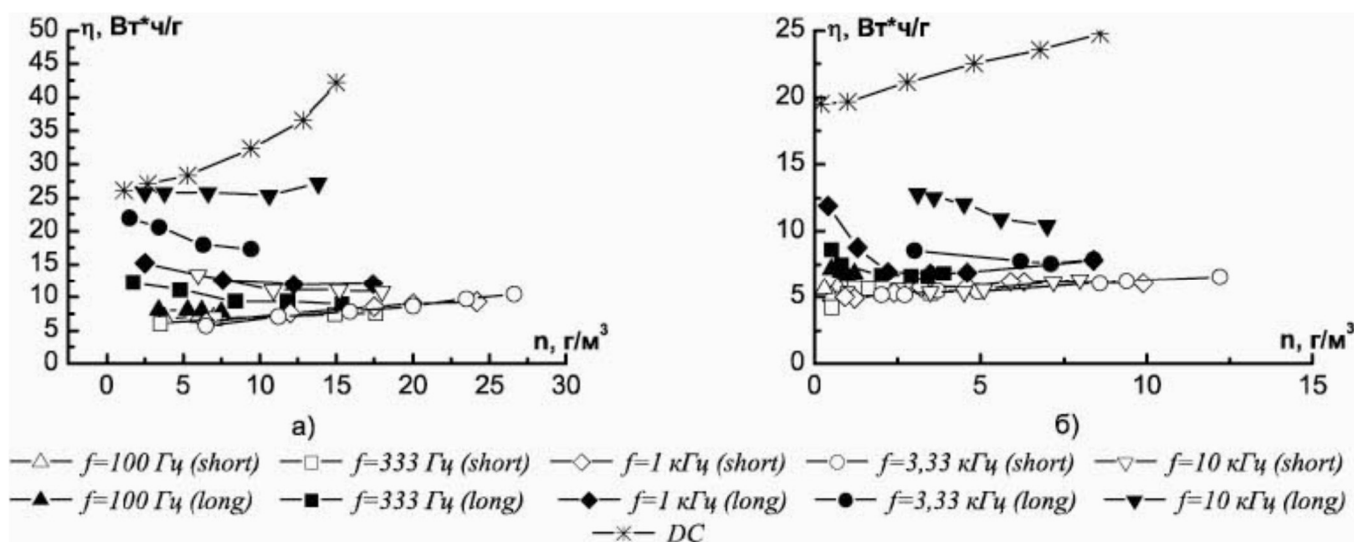


Рис. 9 Енерговитрати на синтез озону в залежності від концентрації озону на виході реактора: а) витрата робочого газу 0,7 л/хв; б) витрата робочого газу 5 л/хв

Показано (Рис. 9), що застосування імпульсного живлення в режимі «short» (тривалість імпульсу напруги є близьким до часу проходження стримерів крізь розрядний проміжок, що виключає витрати енергії на процеси дрейфу іонів між проходженням стримерів) призводять до значного зменшення постійної складової розрядного струму та підвищення ефективності синтезу озону у 3÷4 рази у порівнянні з розрядом за постійного живлення або живлення із довгим імпульсом напруги в режимі «long» (тривалість імпульсу напруги є більшою за період слідування імпульсів струму за живлення постійною напругою).

Основні результати Розділу 4 опубліковані в роботі [36] та доповідалися на конференції [9, 13].

У п'ятому розділі показано приклади застосування безбар'єрних генераторів озону, що були розроблені за використання результатів досліджень, представлених в розділі 1-4.

За результатами досліджень розроблено плазмохімічну систему на основі безбар'єрного газового розряду атмосферного тиску та продемонстровано істотний вплив обробки озono-повітряною сумішшю на зниження мікробіологічного зараження сільськогосподарських культур, запропоновано спосіб передпосівної обробки та методику контролю мікробіологічного зараження при зберіганні окремих сільськогосподарських культур.

Основні результати Розділу 5 опубліковані в роботах [4-6] та доповідалися на конференціях [15-20].

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вперше проведено експериментальні дослідження впливу електронегативних газів на електродинамічні характеристики розряду та плазмохімічні процеси синтезу озону в чотирьох режимах безбар'єрного газового розряду атмосферного тиску в системі електродів голка-площина, що суттєво відрізняються динамікою заряджених частинок, спектральними характеристиками розряду та кінетикою плазмохімічних процесів, а саме:

- Стаціонарний режим розряду при позитивній полярності потенціалу на вістрійному електроді;
- Нестационарний режим розряду при позитивній полярності потенціалу на вістрійному електроді з розповсюдженням первинних стримерів;
- Нестационарний режим розряду при позитивній полярності потенціалу на вістрійному електроді з розповсюдженням первинних та вторинних стримерів;
- Розряд за негативної полярності потенціалу на вістрійному електроді.

Основні вперше отримані результати дисертаційної роботи:

1. Показана кореляція між наявністю умов для дисоціативного прилипання електронів до електронегативних газів в N_2-O_2 сумішах й зміною ВАХ та електродинамічних характеристик в чотирьох режимах розряду в електродній конфігурації голка-площина.
2. Доведено, що вплив електронегативних домішок в N_2-O_2 сумішах на ВАХ режиму нестационарного струму позитивної полярності в електродній конфігурації голка-площина, обумовлений динамікою імпульсної складової розрядного струму, внесок якої зменшується із зростанням концентрації електронегативних домішок в N_2-O_2 суміші.
3. Показано, що поведінка постійної складової струму нестационарного режиму позитивної полярності в електродній конфігурації голка-площина є аналогічною до режиму розряду із стаціонарним струмом за позитивної полярності. Збільшення частки електронегативних домішок в N_2-O_2 сумішах фактично не змінює ВАХ, як постійної складової струму нестационарного режиму позитивної полярності, так і ВАХ режиму стаціонарного струму позитивної полярності в електродній конфігурації голка-площина.
4. Встановлено, що енерговитрати на постійну складову розрядного струму, що визначається наявним дрейфом іонів, не впливають на динаміку синтезу озону за режиму нестационарного струму позитивної полярності в електродній конфігурації голка-площина. Зменшення внеску постійної складової струму за рахунок

імпульсного живлення збільшує ефективність синтезу озону у 3÷4 рази у порівнянні з режимом розряду за постійного живлення.

5. Показано, що більш ефективний синтез озону спостерігається в режимах, в яких наявні умови для дисоціативного прилипання електронів до молекул кисню. Здійснено градацію від найбільш ефективного режиму, яким є режим нестационарного струму позитивної полярності з розповсюдженням первинних стримерів, що замикають розрядний проміжок та подальшим розповсюдженням вторинних стримерів, другим є режим негативної полярності, третім є режим нестационарного струму позитивної полярності з розповсюдженням первинних стримерів, що не досягають катоду. Найменш ефективним режимом розряду є стаціонарний режим позитивної полярності, в якому не спостерігаються умови для дисоціативного прилипання електронів.

Практичне значення дисертаційної роботи полягає в тому, що результати досліджень становлять фізичну основу для створення плазмохімічних реакторів для промислових генераторів озону на базі безбар'єрного газового розряду. Подальше вдосконалення плазмохімічних систем, спрямоване на збільшення внеску імпульсної складової розрядного струму в енергетичний баланс розряду за позитивної полярності, буде сприяти підвищенню ефективності синтезу озону за використання низькотемпературної нерівноважної плазми безбар'єрного розряду. За результатами досліджень розроблено плазмохімічну систему для обробки сільськогосподарських культур. Досліджено вплив озono-повітряної суміші на штами грибів *Aspergillus flavus*, *Penicillium nordicum* та визначено летальну дозу озону для зазначених штамів. Продемонстровано вплив обробки озono-повітряною сумішшю на зниження мікробіологічного зараження при зберіганні зернових культур. Запропоновано плазмохімічні системи та методику контролю мікробіологічного (грибкового) зараження при зберіганні зернових культур. Запропоновано спосіб передпосівної обробки часнику озоном та отримано патент на корисну модель.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці у наукових фахових виданнях України, що входять до міжнародних наукометричних баз:

1. Бруев А.А., Голота В.И., Завада Л.М., Кадолин Б.Б., Карась В.И., Пащенко И.А., **Пугач С.Г.** Нестационарная стадия тлеющего разряда при положительной полярности атмосферного давления // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Плазменная электроника и новые методы ускорения. 2000. №2(1) С. 50-53. (Входить до міжнародних наукометричних баз Scopus, Web of Science). (Особистий внесок – проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз результатів, участь в оформленні роботи та поданні до редакції).

2а. Голота В.И., Кадолин Б.Б., Карась В.И., Пащенко И.А., **Пугач С.Г.**, Яковлев А.В. Синтез озона в игла – плоскость газовом разряде в воздухе // Вопросы атомной науки и техники Серия: Плазменная электроника и новые методы ускорения. 2003. №3(4). С.254-257. (Входить до міжнародних наукометричних баз Scopus, Web

of Science). (Особистий внесок – проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз результатів, участь в оформленні роботи та поданні до редакції)

2б. Голота В.И., Завада Л.М., Кадолин Б.Б., Карась В.И., Пашенко И.А., **Пугач С.Г.**, Яковлев А.В. Исследование нестационарных мод в игла-плоскость газовом разряде при атмосферном давлении в различных N_2-O_2 смесях // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Плазменная электроника и новые методы ускорения. 2003. №3(4). С. 258-262. (Входить до міжнародних наукометричних баз Scopus, Web of Science). (Особистий внесок – проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз результатів, участь в оформленні роботи та поданні до редакції)

3а. Голота В.И., Завада Л.М., Кадолин Б.Б., Карась В.И., Маньковский С.Н., Пашенко И.А., **Пугач С.Г.** Влияние электроотрицательных примесей на разряд атмосферного давления в N_2-O_2 // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Плазменная электроника и новые методы ускорения. 2006. №5(5). С. 86-90. (Входить до міжнародних наукометричних баз Scopus, Web of Science). (Особистий внесок – проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз результатів, участь в оформленні роботи та поданні до редакції).

3б. Голота В.И., Завада Л.М., Котюков О.В., Поляков А.В., **Пугач С.Г.** Повышение эффективности синтеза озона в системе электродов игла-плоскость с импульсным питанием // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Плазменная электроника и новые методы ускорения. 2006. №5(5). С. 91-94. (Входить до міжнародних наукометричних баз Scopus, Web of Science). (Особистий внесок – проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз результатів, участь в оформленні роботи та поданні до редакції).

4. Golota V.I., Taran G.V., Zamuriev A.A., Opalev P.O., **Pugach S.G.**, Mankovskyi S.N., Petrenkova V.P., Nyska I.N. The use of ozone technologies in grain storage // Problems of atomic science and technology. Series: Plasma electronics and new methods of acceleration. 2018. №10(4). С. 185-188. (Входить до міжнародних наукометричних баз Scopus, Web of Science). (Особистий внесок – проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз результатів, участь в оформленні роботи та поданні до редакції).

5. Taran G.V., **Pugach S.G.**, Zamuriev A.A., Opalev P.O., Yaroshenko M.O. Plasma-chemical method of grain fungal contamination control // Problems of atomic science and technology. Series: Plasma Physics. 2020. №26(6). С 127-130. doi:10.46813/2020-130-127. (Входить до міжнародних наукометричних баз Scopus, Web of Science). (Особистий внесок – проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз результатів, участь в оформленні роботи та поданні до редакції).

6. **Pugach S.G.**, Zavada L.M., Zamuriev O.O., Kudin D.V., Opalev P.O., Melnyk A.V., Scherbina S.A., Semchenko O.L. Determination of the optimal ozonation mode for winter garlic planting material // Problems of atomic science and technology. Series: Plasma electronics and new methods of acceleration. 2021. №12(4). С. 204-206. doi:10.46813/2021-134-204. (Входить до міжнародних наукометричних баз Scopus, Web of Science). (Особистий внесок – проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз результатів, участь в оформленні роботи та поданні до редакції).

Наукові праці у зарубіжних наукових спеціалізованих виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз:

7. **Pugach S.G.**, Taran H.V., Kudin D.V., Paschenko I.A. Study of the efficiency of ozone synthesis in a point-to-plane discharge in N_2 - O_2 mixtures // Contributions to Plasma Physics. 2024. №64(1). doi:10.1002/ctpp.202300026. (Входить до міжнародних наукометричних баз Scopus, Web of Science). (Особистий внесок – проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз результатів, участь в оформленні роботи та поданні до редакції).

Наукові праці апробаційного характеру (тези доповідей на наукових конференціях) за темою дисертації:

8. Golota V.I., Zavada L.M., Kadolin B.B., Paschenko I.A., **Pugach S.G.**, Yakovlev A.V. Point-to-plane gas discharge at atmospheric pressure and ozone synthesis in N_2 - O_2 mixtures: Proceedings of the 10 International conference on plasma physics and controlled fusion, 13-18 September, Alushta (Crimea), Ukraine, 2004. P. 7-48. (Особистий внесок – проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз результатів, участь в оформленні роботи та презентація матеріалів на конференції)

9. Golota V.I., Zavada L.M., Kadolin B.B., Paschenko I.A., **Pugach S.G.**, Taran G.V., Yakovlev A.V. Pulsed discharge for ozone synthesis: Proceedings of the 10 International conference on plasma physics and controlled fusion, 13-18 September, Alushta (Crimea), Ukraine, 2004. P. 7-47. (Особистий внесок – проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз результатів, участь в оформленні роботи та презентація матеріалів на конференції)

10. Golota V., Kadolin B., Karas' V., Paschenko I., **Pugach S.** and Yakovlev A. Experimental study of ozone synthesis in atmospheric pressure needle-to-plane gas discharge: Proceedings of the 16 International Symposium on Plasmachemistry, 22-27 June, Taormina, Italy, 2003. P. 653. (Особистий внесок – проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз результатів, участь в оформленні роботи)

11. Karas' V.I., Golota V.I., Zavada L.M., Kadolin B.B., Paschenko I.A., **Pugach S.G.** and Yakovlev A.V. Investigation of nonstationary modes of atmospheric pressure needle-to-plane gas discharge and streamer propagation: Proceedings of the International Conference on Plasma of Low Temperature, 11-15 May, Kiev, Ukraine, 2003. (Особистий внесок – проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз результатів, участь в оформленні роботи та презентація матеріалів на конференції)

12. Golota V., Zavada L., Kadolin B., Karas V', Paschenko I., **Pugach S.**, Yakovlev A. Investigation of nonstationary modes of atmospheric pressure needle-to-plane gas discharge and streamer propagation, In: Proceedings of the 26 th International Conference on Phenomena in Ionized Gases, 15-20 July, Greifswald, Germany, Volume 4, 2003. P. 35-36 (Особистий внесок – проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз результатів, участь в оформленні роботи)

13. Golota V., Zavada L., Karas V', Kotiyukov O., **Pugach S.**, Polyakov A. Influence of a high-voltage power pulse duration on the ozone synthesis efficiency in the system of needle-to-plane electrodes: Proceedings of the 13th International Congress

on Plasma Physics, 22-26 May, Kiev, Ukraine, 2006. P. 152 (Особистий внесок – проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз результатів, участь в оформленні роботи)

14. Golota V., Zavada L., Kadolin B., Karas V', Paschenko I., Minaeva E., **Pugach S.**, Yakovlev A. Influence of electronegative admixtures on atmospheric pressure discharge in N₂/O₂ mixture: Proceedings of the 13th International Congress on Plasma Physics, 22-26 May, Kiev, Ukraine, 2006. P. 170 (Особистий внесок – проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз результатів, участь в оформленні роботи)

15. Golota V.I., **Pugach S.G.**, Taran G.V., Zinchenko V.D., Buryak I.A. Application of the barrierless ozone generator for investigation of ozone influence on a biological objects: Proceedings of the II International conference “Electronics and applied physics”, 11-14 October, Kyiv, Ukraine, 2006. P. 102-103. (Особистий внесок – проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз результатів, участь в оформленні роботи)

16. Golota V., Petrenkova V., **Pugach S.**, Taran G. Determination of toxic and biological effects of ozone-air mixture on the pathogens: Proceedings of the 13th European fusarium seminar, 10-14 May, Martina Franca, Italy, 2015. P. 37. (Особистий внесок – проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз результатів, участь в оформленні роботи та презентація матеріалів на конференції)

17. Petrenkova V., Taran G., Sokol T., **Pugach S.**, Zamuriev A., Opalev P. Inhibitory effect of ozone against aspergillus flavus and penicillium nordicum growth: Proceedings of the 1st Mycokey Conference, 11-14 September, Ghent, Belgium, 2017. P. 196. (Особистий внесок – проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз результатів, участь в оформленні роботи та презентація матеріалів на конференції)

18. Petrenkova V.P., Sokol T.V., Taran G.V., **Pugach S.G.**, Opalev P.O. Ozone-air mixture – inhibitor of pathogens Aspergillus Flavus and Penicillium nirdicum growth: Proceedings of the International scientific and practical conference “Fundamental and applied problems of modern ecology and plant protection”, 14-15 September, Kharkiv, Ukraine, 2017. P. 84-86. (Особистий внесок – проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз результатів, участь в оформленні роботи)

19. Таран Г.В., **Пугач С.Г.**, Замуриєв А.А., Опалєв П.О. Озоновий метод контролю контамінації микотоксинами зернових культур: Збірник наукових статей XVI міжнародної конференції Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення, 13-18 вересня, м. Харків, Україна, 2020. С. 235. (Особистий внесок – проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз результатів, участь в оформленні роботи)

20. Мельник О.В., Семенченко О.Л., **Пугач С.Г.** Визначення оптимального режиму озонування садивного матеріалу часнику озимого: Proceedings of the VII International Scientific and Practical Conference, 1-3 April, Kyoto, Japan, 2021. P. 682. (Особистий внесок – проведення експериментальних досліджень, обробка та аналіз результатів, участь в оформленні роботи)

АНОТАЦІЯ

Пугач С.Г. Вплив електронегативних домішок на електродинамічні характеристики та синтез озону в безбар'єрному розряді з конфігурацією електродів голка-площина. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.08 – фізика плазми. – Інститут плазмової електроніки та нових методів прискорювання Національного наукового центру «Харківський фізико-технічний інститут» Національної академії наук України; Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна Міністерства освіти і науки України, – Харків, 2024.

В дисертаційній роботі показана кореляція між наявністю умов для дисоціативного прилипання електронів до електронегативних газів в N_2 - O_2 сумішах й зміною ВАХ та електродинамічних характеристик в чотирьох режимах розряду. Більш ефективний синтез озону спостерігається в режимах, в яких наявні умови для дисоціативного прилипання електронів до молекул кисню.

Показано, що вплив електронегативних домішок в N_2 - O_2 сумішах на ВАХ режиму нестационарного струму позитивної полярності, обумовлений динамікою імпульсної складової розрядного струму, внесок якої зменшується із зростанням концентрації електронегативних домішок в N_2 - O_2 суміші.

Продemonстровано, що енерговитрати на постійну складову розрядного струму, що визначається наявним дрейфом іонів, не впливають на динаміку синтезу озону за режиму нестационарного струму позитивної полярності. Зменшення внеску постійної складової за рахунок імпульсного живлення підвищує ефективність синтезу озону.

Результати проведених досліджень створюють фізичні основи для розробки новітніх плазмохімічних реакторів, дозволили розробити плазмохімічну систему для зниження мікробіологічного зараження сільськогосподарських культур.

Ключові слова: безбар'єрний розряд атмосферного тиску, дисоціативне прилипання електронів, електродна конфігурація голка-площина, імпульсна складова розрядного струму, низькотемпературна нерівноважна плазмохімія, постійна складова розрядного струму, синтез озону, стример.

ABSTRACT

Serhii G. Pugach. Effect of electronegative impurities on the electrodynamic characteristics and synthesis of ozone in a barrierless discharge with a point-to-plane electrode configuration. – Manuscript.

Thesis for a Candidate Degree in Physics and Mathematics, Specialty 01.04.08 – Plasma Physics. – Institute of Plasma Electronics and New Methods of Acceleration of the National Science Center "Kharkiv Institute of Physics and Technology", the National Academy of Sciences of Ukraine; V. N. Karazin Kharkiv National University of the Ministry of Education and Science of Ukraine, – Kharkiv, 2024.

Barrierless discharge is a promising alternative to the traditional method of ozone generation using barrier discharge. Due to the absence of a dielectric between electrodes the design of the barrierless discharge electrode system is simplified and its resistance to spark

breakdown, reliability and long-term operation in atmospheric conditions with moisture and dust are increased.

The thesis is devoted to the experimental study of a low-temperature non-equilibrium plasma of barrierless gas discharge of atmospheric pressure in the point-to-plane electrode configuration in N_2 - O_2 gases with impurities of electronegative gases; determination and comparison of the effect of electronegative gases on electrical, electrodynamic characteristics, discharge radiation under different discharge modes at positive and negative polarity of the potential on the pointed electrode at DC and pulsed supply of the gas discharge; determination and comparison of ozone synthesis efficiency under different discharge modes in the point-to-plane electrode configuration.

Four modes of DC atmospheric pressure discharge in the point-to-plane electrode configuration, which differ significantly in the dynamics of charged particles, characteristics of the discharge radiation and kinetics of plasma-chemical processes, were experimentally investigated, namely:

- Stationary mode of discharge at positive polarity of the potential on the pointed electrode;
- Non-stationary discharge mode at positive polarity of the potential on the pointed electrode with the propagation of primary streamers;
- Non-stationary discharge mode at positive polarity of the potential on the pointed electrode with propagation of primary and secondary streamers;
- Discharge at negative polarity of the potential on the pointed electrode.

The correlation between the effect of electronegative impurities on the characteristics of discharge modes and the presence of conditions for dissociative attachment of electrons to electronegative gases was shown.

It was demonstrated that the effect of electronegative impurities in N_2 - O_2 mixtures on the I-V characteristic for mode of the non-stationary current of positive polarity is due to the dynamics of the impulse component of the discharge current. The relative contribution of the impulse component of the discharge current to the total discharge current compared to the contribution of the constant component of the current depends significantly on the availability of electronegative impurities. When the concentration of electronegative gases in the N_2 - O_2 mixture increases, the dominant contribution of the impulse component of the discharge current disappears.

It was shown that under different discharge modes, more effective ozone synthesis is observed in the modes with conditions for dissociative attachment of electrons to oxygen molecules. A comparative analysis of the ozone concentration obtained under different modes of gas discharge was shown that the efficiency of ozone synthesis in the stationary mode of positive potential at the tip is $10\div 100$ times lower than the efficiency of synthesis in other modes of discharge, in which there are conditions characteristic for dissociative attachment of electrons to oxygen. The discharge modes were compared in terms of their efficiency of ozone synthesis from the most efficient mode to the least efficient one: (i) - non-stationary current mode of positive polarity at the tip, in which the propagation of primary and secondary streamers is observed; (ii) - discharge at negative polarity at the tip; (iii) - non-stationary current mode of positive polarity at the tip, in which a propagation of

only primary streamers is observed; (iv) - stationary current mode of positive polarity at the tip.

It was demonstrated that the energy costs for the constant component of the discharge current, which is determined by the existing ion drift, does not affect the dynamics of ozone synthesis under the mode of non-stationary current mode of positive polarity. It was shown that reducing the contribution of the constant component by pulsed power supply increases the efficiency of ozone synthesis.

The results of the thesis have been created the physical basis for the development of the latest plasmochemical reactors and allowed the development of a plasmochemical system to reduce microbiological contamination of crops.

Key words: barrierless gas discharge of atmospheric pressure, dissociative attachment of electrons, point-to-plane electrode configuration, impulse component of discharge current, low-temperature non-equilibrium plasma chemistry, constant component of discharge current, ozone synthesis, streamer.