

УДК 537.523

Л.З. БОГУСЛАВСЬКИЙ, С.С. КОЗИРЕВ, Л.Е. ОВЧИННИКОВА, Ю.О. АДАМЧУК, С.В. ЧУЩАК

УМОВИ ЗАПАЛЮВАННЯ ОБ'ЄМНОГО РОЗРЯДУ В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОФІЛЬТРАЦІЇ ГАЗІВ

Досліджено вплив конструкції електродних систем та швидкості газового потоку на умови запалювання та підтримки стабільного об'ємного розряду в системах електрофільтрації газів. Встановлено, що для отримання об'ємного розряду, який займає весь міжелектродний об'єм, необхідне застосування електродної системи типу «щітка» з симетричним розташуванням осаджувальних електродів. Напруга запалювання й інтенсивного світіння такого розряду 55–60 кВ при частоті проходження імпульсів від 1 до 3 кГц. Для недопущення виникнення контракції мінімальна частота проходження імпульсів повинна бути пропорційна швидкості потоку газу і обернено пропорційна довжині каналу прокачування газу.

Ключові слова: об'ємний розряд, електродна система, електрофільтрація промислових газів, швидкість газового потоку, режими запалювання об'ємного розряду.

Л.З. БОГУСЛАВСКИЙ, С.С. КОЗИРЕВ, Л.Е. ОВЧИННИКОВА, Ю.О. АДАМЧУК, С.В. ЧУЩАК

УСЛОВИЯ ЗАЖИГАНИЯ ОБЪЕМНОГО РАЗРЯДА В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОФИЛЬТРАЦИИ ГАЗОВ

Исследовано влияние конструкции электродных систем и скорости газового потока на условия зажигания и поддержания стабильного объемного разряда в системах электрофильтрации газов. Установлено, что для получения объемного разряда, который занимает весь межэлектродный объем, необходимо применение электродной системы типа «щетка» с симметричным расположением осадительных электродов. Напряжение зажигания и интенсивного свечения такого разряда 55–60 кВ при частоте следования импульсов от 1 до 3 кГц. Для недопущения возникновения контракции минимальная частота следования импульсов должна быть пропорциональна скорости потока газа и обратно пропорциональна длине канала прокачки газа.

Ключевые слова: объемный разряд, электродная система, электрофильтрация промышленных газов, скорость газового потока, режимы зажигания объемного разряда.

© Л.З. Богуславський, С.С. Козирев, Л.Е. Овчиннікова, Ю.О. Адамчук, С.В. Чушак, 2018

L.Z. BOHUSLAVSKYI, S.S. KOZYREV, L.E. OVCHYNNIKOVA, Y.O. ADAMCHUK, S.V. CHUSHCHAK

CONDITIONS FOR IGNITION OF THE VOLUME DISCHARGE IN THE SYSTEMS OF GAS ELECTROFILTRATION

The influence of the design of electrode systems and the speed of the gas flow on the conditions of ignition and maintenance of a stable volumetric discharge in the systems of electrofiltration of gases is studied. It is established that to obtain a volume discharge, which occupies the entire interelectrode volume, it is necessary to use an electrode system of the "brush" type with a symmetrical arrangement of the precipitation electrodes. The voltage of ignition and intensive luminescence of such a discharge is 55-60 kV at a repetition rate of 1 to 3 kHz. It became possible to generate the total plasma volume up to 10 L using this electrode system. The mean electric power consumed for sustaining the stable voluminous discharge in this volume was 0.8 W. The research of the effect of gas-dynamic processes on the stability of the voluminous discharge revealed that the gas flow velocity not exceeding 20 m/s produces no effect on the ignition and sustaining of a stable discharge. To prevent the occurrence of contraction, the minimum pulse repetition rate should be proportional to the gas flow rate and inversely proportional to the length of the gas flow channel.

Keywords: volume discharge, electrode system, electrofiltration of industrial gases, gas flow rate, ignition modes of a volume discharge.

Вступ. Останнім часом об'ємний розряд все більш широко застосовується в системах комплексної пилогазоочистки екологічно небезпечних промислових об'єктів [1]. Встановлено, що для збудження об'ємних розрядів у великих об'ємах в електрофільтрах необхідно перенапруження електричного поля, частота проходження імпульсів в кілогерцовому діапазоні й наносекундний фронт імпульсів [2]. Незважаючи на велику кількість проведених досліджень, багато питань по запаленню і підтримці стабільного об'ємного розряду на розгалужених площах вістрійних електродів, що використовуються в промислових електрофільтрах, на сьогоднішній день залишаються відкритими і потребують проведення додаткових досліджень.

В даний час актуальними є завдання щодо захисту атмосфери від забруднення промисловими викидами [3, 4]. У сучасних умовах значення пилогазоочистки різко зростає, оскільки об'єми викидів відходів постійно зростають, що пов'язано як з величезними обсягами виробленої енергії, так і з використанням низькосортного палива. Посилени також вимоги до складу пилу в газах після очищення, що різко збільшило обсяги газів, які потребують газоочистки, розширена номенклатура пилу, від якого необхідно очищати повітря. Для вирішення цих завдань необхідно створення електрофільтрів нового покоління з використанням об'ємного електророзряду [2, 5], що вимагає поглибленого вивчення умов його запалювання, впливу на його параметри технологічних особливостей електрофільтрації, газодинамічних процесів в плазмі розряду й конструктивних характеристик електродних систем.

До теперішнього часу вивчені значення параметрів розряду і їх взаємозв'язки при використанні стандартних вістрійкових електродів. Знайдено умови його запалювання, характеристики горіння і можливі причини контракції [6, 7].

Використання об'ємного розряду в комбінованих системах електрофільтрації промислових викидів має свої особливості, викликані особливостями конструкції електродних систем і технологічними властивостями електрофільтрів, які визначають швидкість газового потоку [8], що істотно впливає на режими об'ємного розряду його стабільність і вимагають проведення поглиблених досліджень.

Мета роботи. Метою роботи є вивчення особливостей використання об'ємного розряду в комбінованих системах електрофільтрації промислових викидів, дослідження впливу конструкції електродних систем,

газодинамічних процесів в плазмі, зокрема швидкості газового потоку, на умови запалювання і підтримку стабільного об'ємного розряду.

Матеріали дослідження. Аналіз електродних систем електрофільтрів показав що форми і конструкції коронуючих електродів, що застосовуються в електрофільтрах вітчизняного і зарубіжного виробництва, в процесі їх вдосконалення, зазнали численних змін.

При проведенні досліджень для реалізації об'ємного струменного розряду були запропоновані вістрійних електроди типу «щітка» двох видів на ізоляційному і металевому підставі.

При заміні стандартного острійкового електрода на електрод типу «щітка» в розрядному проміжку реалізується об'ємний розряд (рис. 1).

Об'ємний розряд був реалізований як на електродах з діелектричною основою (рис. 1, а), так і на металевій основі (рис. 1, б). При малих проміжках між щіткою і осаджувальним електродом (до 80 мм) реалізується тільки об'ємний розряд. У разі збільшення проміжку одночасно спостерігається як об'ємний розряд, так і коронний розряд на паралельних електродних системах (рис. 1, в). Об'ємний розряд запалюється не миттєво з подачею напруги на проміжок, а протягом деякого часу від 30 до 60 с, в залежності від довжини розрядного проміжку. Найкращий стабільний результат при запалюванні розряду спостерігався, коли амплітуда імпульсу напруги наростала поступово за той же проміжок часу від 30 до 60 с. Симетричне розташування електрода типу «щітка» щодо осаджувальних електродів дозволяє отримати об'ємний розряд, який займає весь об'єм електродної системи (рис. 2).

Напруга запалювання такого розряду 55 кВ при частоті проходження імпульсів 1–3 кГц. Найбільш інтенсивне світіння об'ємного розряду спостерігалось при величині робочої напруги приблизно від 58 до 60 кВ. При такій напрузі в діапазоні частот проходження імпульсів від 1 до 3 кГц розряд підтримувався досить тривалий час (в даних експериментах до 30 хв.). При цьому спостерігався дуже високий вихід озону (спостерігалось потемніння ідентифікаційного фільтра). На більш тривалий період часу експериментальну установку не залишали включеною так, як в лабораторії ставало небезпечно знаходитись без спеціальної системи витяжки напрацьованого озону. На даній електродній системі вдалося генерувати загальний об'єм плазмового утворення до 10 л. Споживана з мережі середня потужність на підтримку стабільного об'ємного розряду в даному об'ємі становила 0,8 кВт.



а



б



в

а – вістрійковий електрод типу «щітка» на ізоляційній основі; б – вістрійковий електрод типу «щітка» на металевій основі; в – одночасне отримання коронного й об'ємного розрядів на паралельних електродних системах
Рисунок 1 – Генерація об'ємного розряду

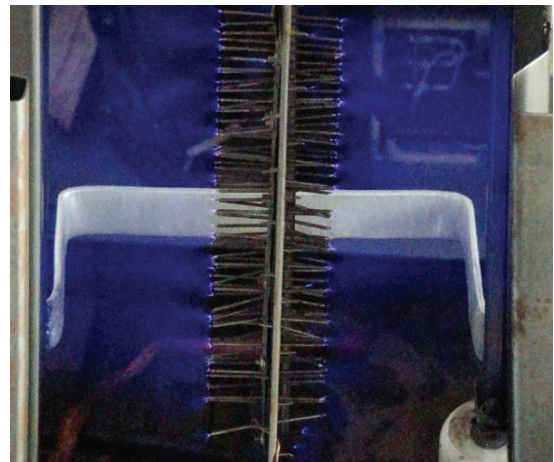


Рисунок 2 – Об'ємний розряд, який займає весь об'єм електродної системи

Таку поведінку об'ємного розряду можна частково пояснити в рамках феноменологічної моделі [6], що розглядає розвиток розряду в попередньо іонізованому середовищі між двома плоскими електродами при подачі на них високовольтного імпульсу з фронтом наростання напруги $t_{\text{ф}}$. Дана модель пояснює появу цуга лавин від катода до анода. Оскільки швидкість руху електронів уздовж силових ліній поля більше, ніж в інших напрямках, то електрони при своєму дрейфі від катода до анода утворюють цуг лавин, що йдуть по сліду один одного і формують струмову нитку. При цьому радіус нитки R_n буде збільшуватися зі швидкістю дифузії електронів. Одночасно з розширенням нитки буде наростати число електронів та іонів в ній. У міру наростання концентрації електронів та іонів швидкість розширення нитки буде сповільнюватися через гальмування електронів полем іонів і швидкість її розширення почне визначатися швидкістю руху іонів. Це трапиться, коли радіус нитки R_n стане рівним радіусу Дебая. Тоді, прирівнюючи радіус нитки до радіусу Дебая і вводячи величину $n_{0\text{кр}} = 1/R_n^3$, можна визначити $n_{0\text{кр}}$. Якщо $n_0 < n_{0\text{кр}}$, то розряд буде складатися з безлічі тонких дифузних ниток, які в сукупності створюють враження однорідного розряду. Ниткоподібна структура розряду спостерігалася під час вирізання оптичним способом тонкої смужки розряду. Крім того, при зростанні n_0 до $n_{0\text{кр}}$ гранична енергія, що вводиться в газ, буде рости внаслідок збільшення числа ниток, а отже, і площі, займаної розрядом, що також встановлено в експериментах [7]. Однак, якщо навіть вдається сформувати однорідний плазмовий стовп ($n_0 = n_{0\text{кр}}$), це є необхідною, але не достатньою умовою збудження розряду в об'ємній формі. На розглянутій стадії, коли існує плазмовий стовп, катодного падіння потенціалу, що забезпечує самопідтримку розряду, ще не сформовано, важливою умовою формування однорідного розряду є забезпечення рівномірної емісії (виходу) електронів з поверхні катода.

Ця умова може бути реалізовано тільки за рахунок бомбардування катода фотонами з плазмового стовпа. Причому через неідеальність катода і необхідність зменшення впливу неоднорідності емісії, що

виникає за рахунок інших факторів, потрібно, щоб фотоемісія перевищувала інші види емісії від 50 до 100 разів. При цьому число квантів, які вибивають електрони з катода, пропорційно об'єму плазмового стовпа V і концентрації електронів в ньому n . Для забезпечення вибивання електронів в потрібній кількості значення nV має бути більше деякої критичної величини $(nV)_{кр}$, яка залежить від умов запалювання розряду. Таким чином, вимоги до n_0 у великих і малих об'ємах різні. Якщо в малих об'ємах для збудження об'ємного розряду необхідно виконати тільки умову по перекриттю струмових ниток, то в великих об'ємах вимоги до n_0 зростають і диктуються умовою $nV \geq (nV)_{кр}$. Відповідно до цієї моделі, на тривалість фронту високовольтного імпульсу накладається додаткове обмеження: вона не повинна бути менше часу перекриття струмових ниток.

Були проведені дослідження впливу швидкості потоку повітря на запалювання і підтримку стабільного об'ємного розряду. Дослідження проведені на макеті електродної системи з продувкою повітря на вістрях типу «щітка» (рис. 3). Швидкість потоку повітря регулювалася в діапазоні від 0 до 20 м/с.



Рисунок 3 – Макет електродної системи з продувкою повітря на вістрях типу «щітка»

Результати експериментальних досліджень показали, що при швидкості 20 м/с, спостерігається невелике здування плазми із зони області розряду (темна область в правій нижній частині міжелектродного проміжку). В цьому випадку спостерігалася і тимчасова затримка запалювання розряду на час від 40 до 50 с. При швидкостях потоку менше 20 м/с плазмова область розряду і час затримок запалювання залишалися ідентичними варіанту без потоку повітря.

Проведені експериментальні дослідження об'ємного розряду показали необхідність врахування газодинамічних процесів в плазмі. Першим необхідно вирішити питання про вплив газодинамічних процесів на стійкість розряду. Згідно з наведеними експериментальними даними потік швидкістю до 20 м/с зовні не впливає на запалювання і підтримку стабільного роз-

ряду, проте в плазмі можливе виникнення різного роду нестійкостей, які можуть призводити до контракції розряду або здування плазми. Самі параметри об'ємної плазми, створюваної стаціонарними розрядами з конвективним охолодженням, обмежені нестійкостями, що розвиваються в плазмі. З цієї причини значення параметрів плазми, які досяжні в стаціонарних розрядах в газових потоках, обмежені умовою

$$l/v = \tau_x, \quad (1)$$

де l – розмір каналу прокачування газу, м; v – швидкість потоку газу, м/с; τ_x – характерний час розвитку нестійкостей плазми, с.

При виконанні умови (1) збурення, що накопичуються, будуть винесені з розрядної зони раніше, ніж вони встигнуть розвинути і порушити однорідність плазми.

Одним із способів збудження конвективно охолоджуваних газових середовищ, які допускають можливість широкої варіації параметрів плазми, є здійснення імпульсно-періодичного режиму підтримки газового розряду. При виконанні умови (1) наступний імпульс струму з'явиться не раніше ніж через час $T = l_0/v$. За цей час з одного боку, середовище встигне охолотитися до наступного імпульсу, а з іншого – в процесі збудження знімається обмеження (1). Це означає, що в імпульс може мати параметри, властиві не стаціонарному, а імпульсному розряду. Наприклад, швидкість виділення енергії в імпульсі не обмежена умовою (1) і тому може бути значно вищою, ніж середня швидкість виділення енергії.

Основними фізичними причинами, що обмежують значення граничної частоти проходження імпульсів розрядного струму, є адиабатичне розширення області нагрітого розрядом газу, наявність градієнтів щільності газу в розрядному об'ємі за рахунок акустичних коливань і розвиток перегрівно-акустичної нестійкості.

Вплив зазначених ефектів можна в значній мірі зменшити відповідним підбором елементів газодинамічного каналу електрофільтру. Так, адиабатичне розширення гарячого газу по потоку вгору можна обмежити, використовуючи вхідний канал малого перерізу. Розвиток же перегрівно-акустичної нестійкості, що відбувається при збігу частоти проходження імпульсів з будь-якою з власних частот акустичного резонатора, можна приглушити зміною довжини каналу, через який прокачується газ.

Висновки. Проведені дослідження впливу конструкції електродних систем на умови запалювання і підтримки стабільного об'ємного розряду показали, що для отримання об'ємного розряду, що займає весь міжелектродний об'єм, необхідне застосування електродної системи типу «щітка» з симетричним розташуванням щодо осаджувальних електродів. Напряга запалювання і інтенсивного світіння такого розряду 55–60 кВ при частоті проходження імпульсів від 1 до 3 кГц. На даній електродній системі вдалося генерувати загальний об'єм плазмового утворення до 10 л. Споживана з мережі середня потужність на підтримку стабільного об'ємного розряду в даному об'ємі стано-

вила 0,8 кВт.

Дослідження впливу газодинамічних процесів на стійкість об'ємного розряду показали, що швидкість газового потоку до 20 м/с зовні не впливає на запалювання і підтримку стабільного розряду, проте в плазмі можливе виникнення різного роду нестійкостей, які можуть призводити до контракції розряду. Для недопущення причин виникнення контракції мінімальна частота проходження імпульсів f_{\min} повинна бути пропорційна швидкості потоку газу v і обернено пропорційна довжині каналу l_0 прокачування газу. У цьому випадку за час між імпульсами іонізовані молекули газу будуть видалені з міжелектродного об'єму, що усуне вплив газодинамічних нестійкостей на розряд.

Список літератури:

1. Богуславский Л.З. Создание макетных образцов высоковольтного оборудования комплексных систем электрофильтрации экологически опасных промышленных выбросов / Л.З. Богуславский, Л.Н. Мирошниченко, В.В. Диордийчук, Д.В. Винниченко, Н.С. Ярошинский // Вестник «ХПИ». Тем. вып. «Техника и электрофизика высоких напряжений». – 2012. – № 52 (958). – Х.: НТУ «ХПИ». – С. 31-39.
2. Богуславский Л.З. Электрофильтрация разноимпедансных газовых выбросов в комплексной системе пылегазоочистки экологически опасных промышленных объектов / Л.З. Богуславский, Л.Н. Мирошниченко // Вестник «ХПИ». Тем. вып. «Техника и электрофизика высоких напряжений». – 2014. – № 21. – Х.: НТУ «ХПИ». – С. 12-16.
3. Родионов А.И. Технологические процессы экологической безопасности / А.И. Родионов, В.Н. Клушин, В.Г. Систер // Калуга: Изд-во Н. Бочкаревой, 2000. – 800 с.
4. Чекалов Л.В. Основы разработки и конструирования электрофильтров нового поколения / Л.В. Чекалов // ИнформЦентр. – 2006. – № 5. – С. 67-69.
5. Богуславский Л.З., Мирошниченко Л.М., Диордийчук В.В. Пат. 90293, Україна. Спосіб деструкції різноімпадансних газових викидів небезпечних промислових об'єктів. Заявник та патентовласник Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України. – № u 2013 11731; заявл. 04.10.2013; опубл. 26.05.14. Бюл. № 10.
6. Мезяц Г.А. Импульсная энергетика и электроника / Г.А. Мезяц // М.: Наука, 2004. – 704 с.
7. Осипов В.В. Самостоятельный объемный разряд / В.В. Осипов // УФН. – 2000. – Т. 170. – С. 225-245.
8. Богуславский Л.З. Влияние режимов работы высоковольтного источника питания на формирование стримерного ко-

ронного разряда и эффективность систем газоочистки / Л.З. Богуславский, Л.Н. Мирошниченко, Ю.Г. Казарян, Н.С. Ярошинский // Технічна електродинаміка. Тем. вип. Силова електроніка та енергоефективність. – Ч. 1. – 2011. – С. 44-49.

References (transliterated):

1. Boguslavskij L.Z., Myroshnychenko L.N., Dyordiychuk V.V., Vynnychenko D.V., Yaroshynskij N.S. Sozdanie maketnyh obrazcov vysokovoltного oborudovaniya kompleksnyh sistem elektrofilitracii ekologicheski opasnyh promyshlennyh vybrosov [Creation of prototypes of high-voltage equipment for complex electrofiltration systems for environmentally hazardous industrial emissions]. Vestn. Khar'k. politehn. in-ta, 2012. No 52 (958). P. 31-39.
2. Bohuslavskyy L.Z., Myroshnychenko L.N. Elektrofiltratsyya raznoympedansnykh hazovykh vybrosov v kompleksnoy systeme pyl'egazoochystky ekologicheski opasnyh promyshlennykh ob'yektov [Electrophiltration of different-impedance gas emissions in a complex dust-gas cleaning system of environmentally hazardous industrial facilities] // Vestn. Khar'k. politehn. in-ta, 2014. No 21. P. 12-16.
3. Rodionov A.I., Klushin V.N., Sister V.G. Tehnologicheskie protsessy ekologicheskoy bezopasnosti [Technological processes of ecological safety]. Kaluga: Izd N. Botchkareva, 2000. 800 p.
4. Chekalov L. V. Osnovy razrabotki i konstruirovaniya elektrofiltrov novogo pokoleniya [Fundamentals of design and development of a new generation of electrostatic]. InformCement. 2006. № 5. P. 67-69.
5. Bohuslavskyy L.Z., Myroshnychenko L.M., Diordiychuk V.V. Spisib destruktivnykh riznoimpedansnykh hazovykh vykydiv nezbepechnykh promyslovykh ob'yektiv [Method of destruction of multi-impedance gas emissions of hazardous industrial objects]. Pat. 90293 Ukrainy, № u 2013 11731; zayavl. 04.10.2013; opubl. 26.05.14. Byul. No 10.
6. Mesyats G.A. Impulsnaya energetika i elektronika [Impulse power and electronics]. Moscow: Nauka, 2004. 704 p.
7. Osipov V.V. Samostoyatelnyy ob'emnyy razryad [Self-contained volume discharge]. UFN. 2000. Vol. 170. P. 225-245.
8. Boguslavskij L.Z., Myroshnychenko L.N., Kazaryan Yu.G., Yaroshynskij N.S. Vlijanie rezhimov raboty vysokovoltного istochnika pitaniya na formirovanie strimernogo koronnogo razrjada i effektivnost sistem gazoochystki [Influence of operating modes of a high-voltage power source on the formation of a streamer corona discharge and the efficiency of gas cleaning systems]. Tehn. elektrodinamika. Tem. vyp. Sylova elektronika ta energotfektyvnist. 2011. P. 44-49.

Надійшла (received) 30.03.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Богуславський Леонід Зіновійович (Богуславский Леонид Зиновьевич, Bohuslavskiy Leonid Zinoviiovych) – кандидат технічних наук, доцент, зав. відділу імпульсних електротехнічних систем, Інститут імпульсних процесів і технологій (ІПТ) НАН України, м. Миколаїв; e-mail: dres@iipr.com.ua.

Козирев Сергій Сергійович (Козырев Сергей Сергеевич, Kozurev Serhij Serhijovych) – кандидат технічних наук, доцент, Національний університет кораблебудування, м. Миколаїв; e-mail: skozurev@gmail.com.

Овчиннікова Лариса Єфремівна (Овчинникова Лариса Ефремовна, Ovchynnikova Larysa Yefremivna) – кандидат технічних наук, доцент, старший науковий співробітник, Інститут імпульсних процесів і технологій (ІПТ) НАН України, м. Миколаїв; e-mail: lora947@gmail.com.

Адамчук Юрій Олегович (Адамчук Юрий Олегович, Adamchuk Yuriy Olehovych) – молодший науковий співробітник, Інститут імпульсних процесів і технологій (ІПТ) НАН України, м. Миколаїв.

Чушак Сергій Володимирович (Чушак Сергей Владимирович, Chushchak Serhij Volodymyrovych) – молодший науковий співробітник, Інститут імпульсних процесів і технологій (ІПТ) НАН України, м. Миколаїв.