

ЕЛЕКТРОСТАТИЧНЕ ПОЛЕ В КАМЕРІ БАР'ЄРНОГО РОЗРЯДУ ДЛЯ ОЧИЩЕННЯ ВОДИ З УРАХУВАННЯМ ОКРЕМИХ ВОДНИХ КРАПЕЛЬ

Р.С. Кришук

Інститут електродинаміки НАН України
пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна
e-mail: dygogive@gmail.com

Використання імпульсного діелектричного бар'єрного розряду (ІДБР) для очищення води за допомогою низькотемпературної плазми (НТП) є перспективною технологією. ІДБР забезпечує очищення води в крапельно-плівковому стані від органічних забруднювачів шляхом утворення високоактивних молекул (радикали OH , O , молекули H_2O_2 , O_3), що генеруються в НТП при контакті з водою. Розроблено двовимірну модель для розрахунку електростатичного поля розрядної камери (РК) для ІДБР, яка включає два електроди, діелектричний бар'єр, дві краплі або струмені води в повітряному проміжку та водяні плівки. У моделі застосовується рівняння Лапласа для електростатичного поля з періодичними граничними умовами. Запропоновано вирази для встановлення довжини симетричної частини РК та визначення напруги на електродах із постійною площею поверхні краплин і постійним середнім значенням напруженості в повітряному проміжку незалежно від радіуса крапель. Проведено дослідження залежності енергії електростатичного поля та ємності РК від радіуса крапель та їхнього взаємного розташування за довжиною РК. Показано зміну напруги на електродах та залежність кількості крапель на одиницю довжини РК від їхнього радіуса. Виконано аналіз розподілу напруженості електричного поля, ємності РК та накопиченої енергії. Досліджено середню напруженість електричного поля на поверхні крапель і плівок води. Встановлено електричні сили, що діють на краплі за допомогою тензора напружень Максвелла. Виведено вираз для розрахунку рекомендованої кількості води в формі крапель або струменів води на одиничні розміри РК для одержання більш рівномірного розподілу напруженості електричного поля в РК та мінімізації впливу електричних сил на краплини. Бібл. 18, рис. 7.

Ключові слова: бар'єрний розряд, математична модель, оптимізація розмірів, електростатичне поле, розрядна камера, очищення води.

Вступ. З огляду на посилення забруднення водойм і річок токсичними органічними сполуками очищення води, зокрема видалення токсичних органічних сполучень, є особливо актуально. Традиційні технології, які використовуються для приведення якості води у відповідність до стандартних вимог, часто виявляються неефективними для руйнування стійких органічних забруднювачів (СОЗ).

Унаслідок збільшення виробництва у фармацевтичній, хімічній та інших галузях промисловості спостерігається зростання кількості СОЗ, що погано піддаються видаленню традиційними методами водоочищення. Це зумовлює необхідність реалізації додаткових етапів очистки на станціях для ефективного видалення СОЗ.

Останні десятиліття відзначені інтенсивними дослідженнями процесів передової окислювальної обробки (AOPs), які генерують високоактивні частинки (радикали OH , O , молекули H_2O_2 , O_3) для очищення води безпосередньо в реакційній зоні. Ці сполуки здатні комплексно руйнувати хімічну структуру СОЗ і сприяти ефективному очищенню [1]. Наприклад, у [2] розглядаються перспективи використання перкарбонату в процесах розвиненої окисної обробки (AOPs) для очищення води, підкреслено його ефективність у видаленні органічних забруднювачів завдяки генерації реактивних кисневих видів, аналізуються механізми окиснення, практичного застосування AOPs і пропонуються стратегії для покращення їхньої ефективності в реальних умовах. У [3] представлено огляд розвитку технологій очищення води з використанням магнітно-відокремлюваних каталітичних матеріалів, механізми активації, повторне використання та можливості оптимізації для поліпшення їхньої ефективності в реальних умовах. Розглядається активізація персульфату (PS) за допомогою магнітно-відокремлюваних каталітичних матеріалів у процесах AOPs для очищення води. У [4] описується новий підхід до створення нанокомпозитних мембран на основі графенового оксиду, які демонструють високу ефективність очищення води. Однією з основних переваг

АОРс над традиційними методами обробки води, такими як хлорування та біологічна обробка, є відсутність потреби у використанні додаткових хімічних речовин, що часто призводить до утворення шкідливих побічних продуктів. Ефективність та доцільність впровадження АОРс визначається кількістю питомих енерговитрат на очищення, оперативними та капітальними витратами на виготовлення та монтаж обладнання [5].

Особливу перспективність для промислового очищення води має низькотемпературна плазма (НТП) [6]. Цей тип плазми відомий під різними назвами, як-от плазмовий струм, діелектричний бар'єрний розряд та коронний розряд, що відображає різноманіття методів її генерації. Високоенергетичні електрони та високоактивні частинки генеруються для безпосереднього окислення розчинених органічних молекул. Ця технологія належить також до типу АОРс. Особливо перспективним у цьому контексті є застосування високовольтних електричних розрядів, зокрема імпульсного діелектричного бар'єрного розряду (ІДБР), який проводиться безпосередньо на поверхню оброблюваної води і демонструє високу енергетичну ефективність [7] порівняно з іншими типами розрядів [6, 8]. Високоактивні частинки генеруються за допомогою НТП у газовому (повітряному) просторі між електродами та водою.

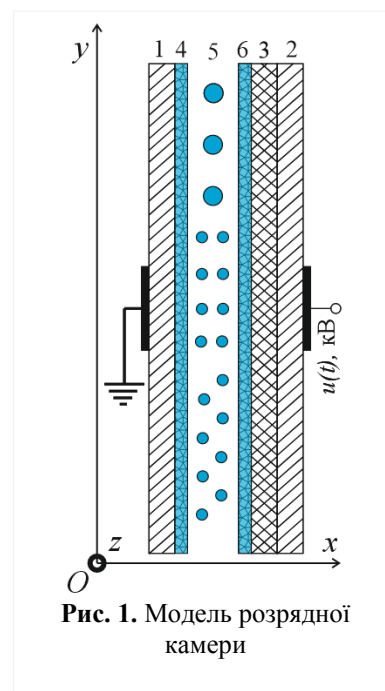
У [6] представлено огляд стану останніх досліджень щодо застосування НТП в очищенні води. Автори акцентують увагу на енергетичних перевагах НТП та описують різні стратегії її використання у водоочищенні. Обговорюються перспективи інтеграції НТП з іншими технологіями, такими як каталіз, мембранна фільтрація та біологічне розкладання. Хоча лабораторні експерименти свідчать про обнадійливі результати для промислового застосування технології НТП, необхідні подальші дослідження та міждисциплінарні колаборації.

Енергетична ефективність ІДБР визначається співвідношенням маси розкладених забруднювачів до витраченої енергії [7, 1]. Серед основних переваг технології ІДБР — висока стерильність обробленої води, відсутність необхідності використання хімічних реагентів та висока ефективність розкладання стійких органічних сполучень, включно з фенолами та їхніми похідними. Наприклад, у [9] представлено новий підхід до деградації бісфенолу А із використанням тривимірної синергетичної системи, що поєднує діелектричний бар'єрний розряд (ДБР), пероцтову кислоту та іони заліза (Fe^{2+}). Дослідження показало, що ця система здатна ефективно знижувати концентрацію бісфенолу А на 97.3 % протягом 15 хвилин завдяки взаємодії між компонентами, що сприяє збільшенню продуктивності реакційних компонентів. Результати також свідчать про зниження токсичності продуктів розпаду порівняно з початковим вмістом бісфенолу А, що вказує на екологічну безпеку цього методу.

Оскільки НТП створюється електричними полями, то теоретичний аналіз електричного поля в розрядних камерах ІДБР для очищення води НТП буде мати позитивний результат для покращення цієї технології із метою збільшення ефективності очищення та зменшення витрат енергії для очищення води [7].

На рис. 1 зображено модель розрядної камери (РК) у двовимірній постановці для ІБР із двома плоскими електродами: катодом 1 та анодом 2, який ізольований діелектриком 3 (бар'єр). У камері знаходиться повітряний проміжок 5, рівномірно заповнений краплинами води (або струменями), що рухаються в напрямку координати z , а також вода у формі плівок (4, 6) на краях повітряного проміжку. Краплини води можуть бути різного діаметру, але за своєю площею рівномірно розподілені в повітряному проміжку.

Про можливість очищення води, що подається в формі краплин, описано в працях [10, 11]. Діаметр досліджуваних краплин може варіюватися від 0,5 до 1,5 мм [10]. У [11] до електродів подавався полідисперсний факел краплин діаметром 0,06 ... 0,5 мм, що мав усереднене значення 0,4 мм, зі



швидкістю на вході в розрядну камеру – 2,4 м/с. На анод РК подавалася змінна (імпульсна) напруга $u(t)$ від джерела живлення [12]. Очевидно (рис. 1), що РК – конденсатор із двошаровим діелектриком [13], яким є повітряний проміжок (5) та бар'єр (3). Під час зростання напруги від 0 до амплітудного значення U_m такий конденсатор заряджається, і за певної напруги пробою повітряного проміжку створюється електропровідна НТП. Далі, у разі зростання напруги до значення U_m , через НТП протікає електричний струм, яким заряджається діелектричний бар'єр 3. Процес іонізації повітря, створення НТП та переміщення зарядів через НТП, що з'являється в повітряному проміжку 5 (рис. 1), призводить до генерування хімічно активних частинок [6], запускання хімічних реакцій з органічними сполученнями, що знаходяться в поверхневих шарах води [1, 7, 14, 15].

Очищення води здійснюється близько до її поверхні – на межі вода-повітря [14]. Тому важливо встановити оптимальні розміри і кількість краплин води в повітряному проміжку 5 (рис. 1) з урахуванням розподілу напруженості електричного поля, накопиченої енергії електричного поля та площі поверхні води в повітряному проміжку. Краплини можуть бути розміщені в один або в кілька рядів (рис. 1) за шириною повітряного проміжку з певним кроком за його довжиною. У випадку подачі краплин у кілька рядів доцільно встановити вплив взаємного зміщення краплин за довжиною проміжку на розподіл напруженості електричного поля та сили, що притягують краплини до плівок води під дією електричного поля.

Метою роботи є визначення впливу розмірів та розміщення крапель води на розподіл напруженості та енергетичні характеристики електростатичного поля в повітряному проміжку розрядної камери імпульсного діелектричного бар'єрного розряду з плоскопаралельними електродами для одержання рекомендованої кількості води в повітряному проміжку.

Модель РК зображена на рис. 2. Ескіз демонструє симетричну частину РК у площині xOy , що використовується для моделювання напруженості електростатичного поля у двовимірній постановці методом скінченних елементів. Припускається, що геометрія не змінюється за просторовою координатою z . На рис. 2 *а* краплини розміщені в один ряд за координатою x , на рис. 2 *б* – максимально зміщені за координатою y . Числові позначення 1–6 відповідають складовим частинам РК, наведеним на рис. 1; φ_1 та φ_2 – електричні потенціали на електродах, R_d – радіус краплин, h_s – довжина симетричної частини РК за координатою y . Центри краплин розміщені відповідно на 25 та 75 % від загальної ширини повітряного проміжку 5 уздовж x , що забезпечить симетричний розподіл напруженості електричного поля навколо кожної краплини. Краплини розміщені рівномірно в повітряному проміжку.

Модель передбачає розгляд крапель в їхньому поперечному перерізі, без зміщення за координатою z . Характеристики електростатичного поля в моделі (рис. 2) із плоскими краплями в площині xOy будуть дещо відрізнятися від розрахунків для сферичних крапель у тривимірному просторі [13]. Тому краплі на рис. 2 також можуть інтерпретуватися як водяні струмені вздовж осі z , що плавно переходять у краплини в процесі витікання [11]. У конфігурації на рис. 2 *а* дві краплі розташовані так, що розподіл напруженості навколо них симетричний відносно лінії між краплями. Під час обчислення накопиченої енергії електричного поля, електричної ємності РК, заряду на межах провідник-діелектрик та електростатичних сил на внутрішніх границях моделі довжину РК вздовж координат z і y прийнято вважати рівною одному метру.

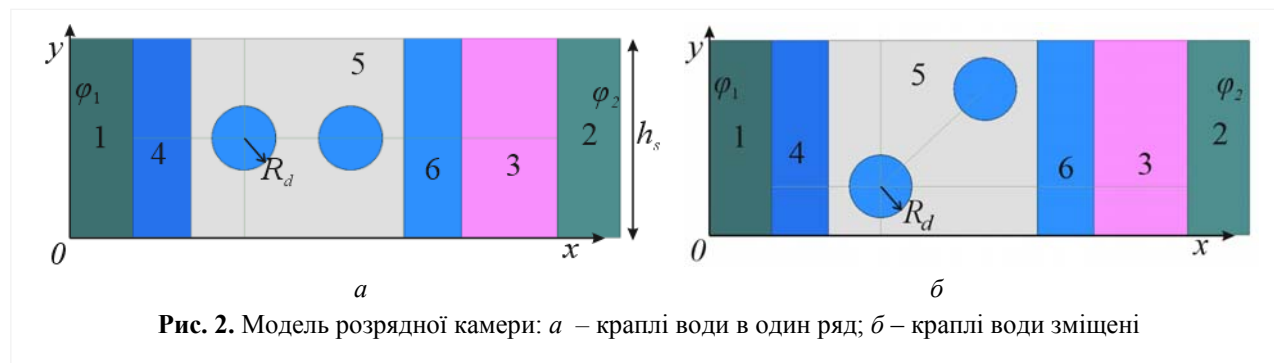


Рис. 2. Модель розрядної камери: *а* – краплі води в один ряд; *б* – краплі води зміщені

Рівняння електричного поля. Для визначення розподілу електростатичного поля застосовується основне рівняння електростатики – рівняння Пуассона [13].

$$\nabla(\nabla\varphi) = -\rho/\varepsilon_a, \quad (1)$$

де $\varepsilon_a = \varepsilon_0\varepsilon_r$, $\varepsilon_r = 1 + \chi_e$.

Тут φ – електричний потенціал, що відображає потенціальну енергію заряду; ∇ – оператор Гамільтона; ρ – об'ємна густина заряду; ε_0 – електрична стала; ε_r – відносна діелектрична проникність; ε_a – абсолютна діелектрична проникність; χ_e – діелектрична сприйнятливості. У розрахунках враховується ε_r у вигляді раціонального числа. Взаємозв'язок між напруженістю електричного поля $\mathbf{E}$, електричною індукцією $\mathbf{D}$, поляризацією $\mathbf{P}$ та електричним потенціалом φ задається такими відомими виразами:

$$\mathbf{E} = -\nabla\varphi, \quad \mathbf{D} = \varepsilon_0\mathbf{E} + \mathbf{P}, \quad \mathbf{P} = \varepsilon_0\chi_e\mathbf{E} \quad (2)$$

Прийнято, що в областях моделі між електродами вільних зарядів немає ($\rho = 0$), тому для моделювання використовується рівняння Лапласа:

$$\frac{\partial^2\varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\varphi}{\partial y^2} = 0. \quad (3)$$

Граничні умови. У процесі бар'єрного розряду в розрядній камері зі збільшенням напруженості електричного поля в повітряному проміжку 5 (рис. 2) відбувається іонізація. За досягнення певного рівня напруженості формується низькотемпературна плазма (НТП), у якій відбувається перенесення зарядів від електрода 1 до поверхні діелектричного бар'єру 3, що спричиняє його заряджання [1]. У цьому дослідженні процеси іонізації повітря не враховуються, тому модель розглядається до настання іонізації. Відповідно прийнято умову про відсутність вільних зарядів у моделі (рис. 2), що дає змогу використовувати рівняння Лапласа (3). Із урахуванням цієї умови *на межах провідник-діелектрик* (рис. 2) застосовуються відповідні граничні умови [13]:

$$D_n^+ = \sigma, \quad (4)$$

де D_n^+ – нормальна складова індукції зі сторони діелектрика, σ – поверхнева густина заряду на провіднику, Кл/м². Із урахуванням рівняння (4) заряд уздовж межі діелектрик-провідник l на один метр довжини РК уздовж координати z розраховується за таким виразом:

$$q = \int_l D_n^+ dl \quad (5)$$

На границях діелектрик-діелектрик з урахуванням умови відсутності вільних зарядів між електродами РК виконується гранична умова [13]

$$D_n^+ = D_n^-. \quad (6)$$

На лініях симетрії за вертикальною координатою y (рис. 2) застосовано граничні умови періодичності:

$$\mathbf{E}^+ = \mathbf{E}^-, \quad (7)$$

де $\mathbf{E}^+$ – напруженість електричного поля на верхній границі (рис. 2) – площина xOz , $y = h_s$, $\mathbf{E}^-$ – на нижній границі ($y = 0$).

Напруженість електричного поля навколо краплини, що перебуває в однорідному полі, є неоднорідною (E_1) [13]. У міру віддалення від центру краплини в напрямку координати y на певній відстані, залежній від її радіуса, E_1 зростає від нуля до значення однорідного поля E_0 [13]. Висота h_s симетричної частини моделі РК (рис. 2) визначається аналітичним виразом на основі аналітичного методу розрахунку в [13], де розглядається електричне поле навколо циліндра в однорідному електричному полі:

$$h_s = 2R_d\sqrt{\gamma/(1-\sqrt{\beta})}, \quad (8)$$

де $\gamma = \frac{\varepsilon_d - \varepsilon_g}{\varepsilon_d + \varepsilon_g}$, $\beta = E_1/E_0$.

Тут ε_d , ε_g – відповідно діелектрична проникність краплин води та повітря (газу) в повітряному проміжку, E_1 – напруженість електричного поля між краплинами вздовж y . Таким чином, довжина моделі h_s буде змінюватися залежно від радіусу краплин за виразом (8). Якщо краплини є електрично провідні, тоді $\varepsilon_d \rightarrow \infty$ і $\gamma = 1$ [13].

На зовнішніх границях електродів 1 та 2 (рис. 2) за координатою x (площина yOz) подано електричний потенціал відповідно:

$$\varphi_1 = 0 \text{ та } \varphi_2 = U_e - \varphi_1, \quad (9)$$

де U_e – напруга між електродами РК.

У [16] припускається, що оброблення води в газовому проміжку є ефективнішим за умови однорідного імпульсного бар'єрного розряду, тобто рівномірного розподілу розряду в усьому досліджуваному об'ємі. Таким чином, у подальших розрахунках середня напруженість електричного поля (E_5) у повітряному проміжку буде сталою для всіх розмірів краплин.

Напруга на електродах U_e (9) розраховується з урахуванням ширини повітряного проміжку d_g та радіусу краплин R_d , де краплі замінені еквівалентною плівкою води в повітряному проміжку шириною

$$d_d = N_d \pi R_d^2 / h_s, \quad (10)$$

де $N_d = 2$ – кількість краплин (рис. 2).

Складено рівняння балансу напруги в РК:

$$U_e = U_g + U_d + U_f + U_b - U_{gd} - U_{gf}, \quad (11)$$

де U_g – падіння напруги в повітряному (газовому) проміжку шириною d_g між плівками води 4 та 6 (рис. 2); U_d – падіння напруги в еквівалентній плівці d_d (10); U_f – сумарне падіння напруги у плівках води 4, 6 (рис. 2) сумарною шириною d_f ; U_b – падіння напруги в діелектричному бар'єрі; U_{gd} та U_{gf} – падіння напруги в тій частині повітря повітряного проміжку d_g , що витіснена відповідно еквівалентною плівкою d_d та плівками води d_f . Вираз (11) можемо записати так:

$$U_e = \frac{D}{\varepsilon_g} (d_g - d_d - d_f) + \frac{D}{\varepsilon_d} d_d + \frac{D}{\varepsilon_f} d_f + \frac{D}{\varepsilon_b} d_b, \quad (12)$$

де ε_g , ε_d , ε_f , ε_b – абсолютна діелектрична проникність (1) матеріалу, відповідно повітря, краплин води, плівок води та діелектричного бар'єру.

Припустимо, що в повітряному проміжку шириною d_g , у якому також розміщені плівки шириною d_d та d_f , задано напруженість електричного поля E_0 . Тоді вираз (12) має такий вигляд:

$$U_e = E_0 d_g \left(1 - \frac{d_d}{d_g} - \frac{d_f}{d_g} + \frac{\varepsilon_g}{\varepsilon_d} \frac{d_d}{d_g} + \frac{\varepsilon_g}{\varepsilon_f} \frac{d_f}{d_g} + \frac{\varepsilon_g}{\varepsilon_b} \frac{d_b}{d_g} \right). \quad (13)$$

Якщо приймається умова, що вода є електропровідною ($E = 0$), а ширина плівок d_f не знаходиться всередині повітряного проміжку d_g , то вираз (13) запишеться так:

$$U_e = E_0 d_g \left(1 - \frac{d_d}{d_g} + \frac{\varepsilon_g}{\varepsilon_b} \frac{d_b}{d_g} \right). \quad (14)$$

Параметри моделі. Для виконання розрахунку рівняння (3) в областях моделі 1–6 на рис. 2 з граничними умовами (4)–(14) задано параметри: $E_0 = 1$ кВ/мм (у 14); $\beta = 0,86$ (у 8); металеві анод 2 та катод 1 шириною 1 мм; водяні плівки шириною 0,91 мм кожна; діелектричний

бар'єр 3 – $d_b=1,5$ мм, $\varepsilon_b=5,5\varepsilon_0$; повітряний проміжок 5 – $d_g=3,36$ мм, $\varepsilon_g=1,0006\varepsilon_0$; прийнята умова, що краплини води в умовах НТП набувають властивостей провідників ($E=0$), $\varepsilon_d \rightarrow \infty$; радіус краплин R_d – у діапазоні 0,05–0,6 мм з інтервалом 0,05 мм. Зауважимо, що в загальному випадку, якщо вода і краплини води електропровідні, доцільно розглядати модель з їхньою електропровідністю, проте в цій роботі розглядається електростатичне поле (3), в якому для всіх електропровідних елементів задається поле $E=0$.

На рис. 3 а зображено кількість N_d та площа S_w краплин на 1 м уздовж у, довжина моделі розрядної камери h_s (8). Неважко порахувати, що сумарна довжина границі краплина-повітря має незмінне значення 1,7 м на 1 метр довжини РК уздовж у.

Рис. 3 б ілюструє відповідне середнє значення напруженості

$$E'_0 = \frac{1}{s_g} \int |\mathbf{E}| ds_g, \quad s_g = h_s d_g. \quad (15)$$

та задану напругу на електродах (14). Крива 1 відповідає моделі рис. 2 а, а крива 2 – рис. 2 б. Одержано $E'_0 \approx E_0$ за допомогою виразу (14).

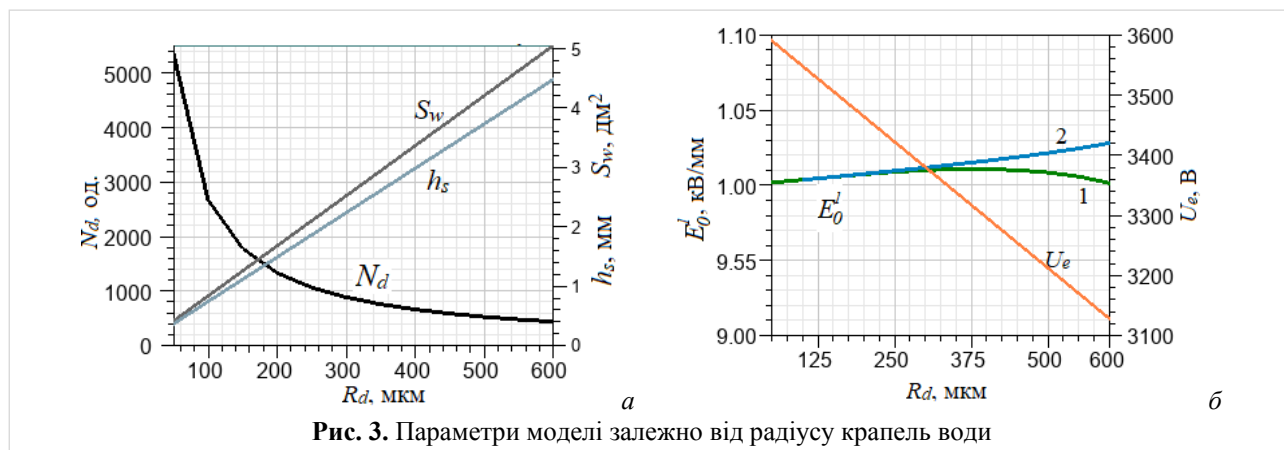


Рис. 3. Параметри моделі залежно від радіусу крапель води

Результати дослідження. Рис. 4 демонструє залежності накопиченої енергії W електростатичного поля та ємності камери як конденсатора C на площу 1 м^2 у площині uOz , оскільки результат розрахунку енергії [13] симетричної частини РК (рис. 2) ділиться на h_s :

$$W = \frac{1}{2h_s} \int (\mathbf{E} \cdot \mathbf{D}) ds = \frac{1}{2h_s} C U_e^2, \quad (16)$$

де s – площа всієї моделі на рис. 2. Оскільки напруженість поля в повітряному проміжку (15) практично постійна (рис. 3 б), то енергія (16) не залежить від радіусу крапель. Тоді ємність відповідно до (16) та (14) прямопропорційно залежить від радіусу краплин за незмінної сумарної довжини границь крапля-повітря на 1 метр довжини РК за координатою у.

Розміщення крапель в один ряд уздовж осі x (рис. 2а), за якого вони перекривають повітряний проміжок на $1/3 \dots 2/3$, підвищує неоднорідність розподілу напруженості, що показано далі на рис. 5. Це створює підсилення не тільки на поверхнях крапель уздовж x , але й у всьому проміжку між краплею та ближчою до краплини водяною плівкою, що призводить до збільшення ємності та енергії на $0 \dots 6\%$ (криві 1, рис. 4).

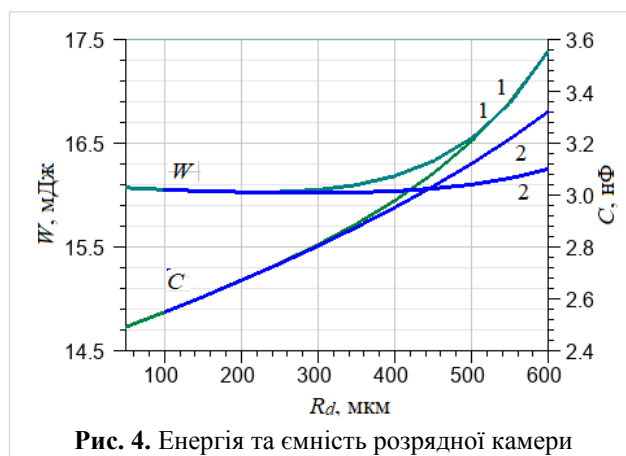


Рис. 4. Енергія та ємність розрядної камери

На рис. 5 показано розподіл напруженості електричного поля через центр краплини – уздовж x та y . Якщо $R_d < 0,30$ мм, підсилення напруженості електричного поля між краплиною та краєм повітряного проміжку відбувається лише біля поверхні краплин, тому криві 1 та 2 на рис. 4 для цих значень R_d співпадають. У той час, коли при $R_d > 0,30$ мм спостерігається підсилення напруженості, що охоплює всю ширину проміжку між краплиною та краєм повітряного проміжку, а також між краплинами для моделі на рис. 2 а, що призводить до збільшення ємності та накопичення енергії (рис. 4, криві 1). Водночас уздовж y напруженість поля E між краплинами майже не залежить від радіусу краплин і встановлена коефіцієнтом β , проте на рис. 5 з унаслідок впливу сусідньої, зміщеної за y краплини $R_d = 0,6$ мм напруженість поля між краплинами збільшена до 1 кВ/мм.

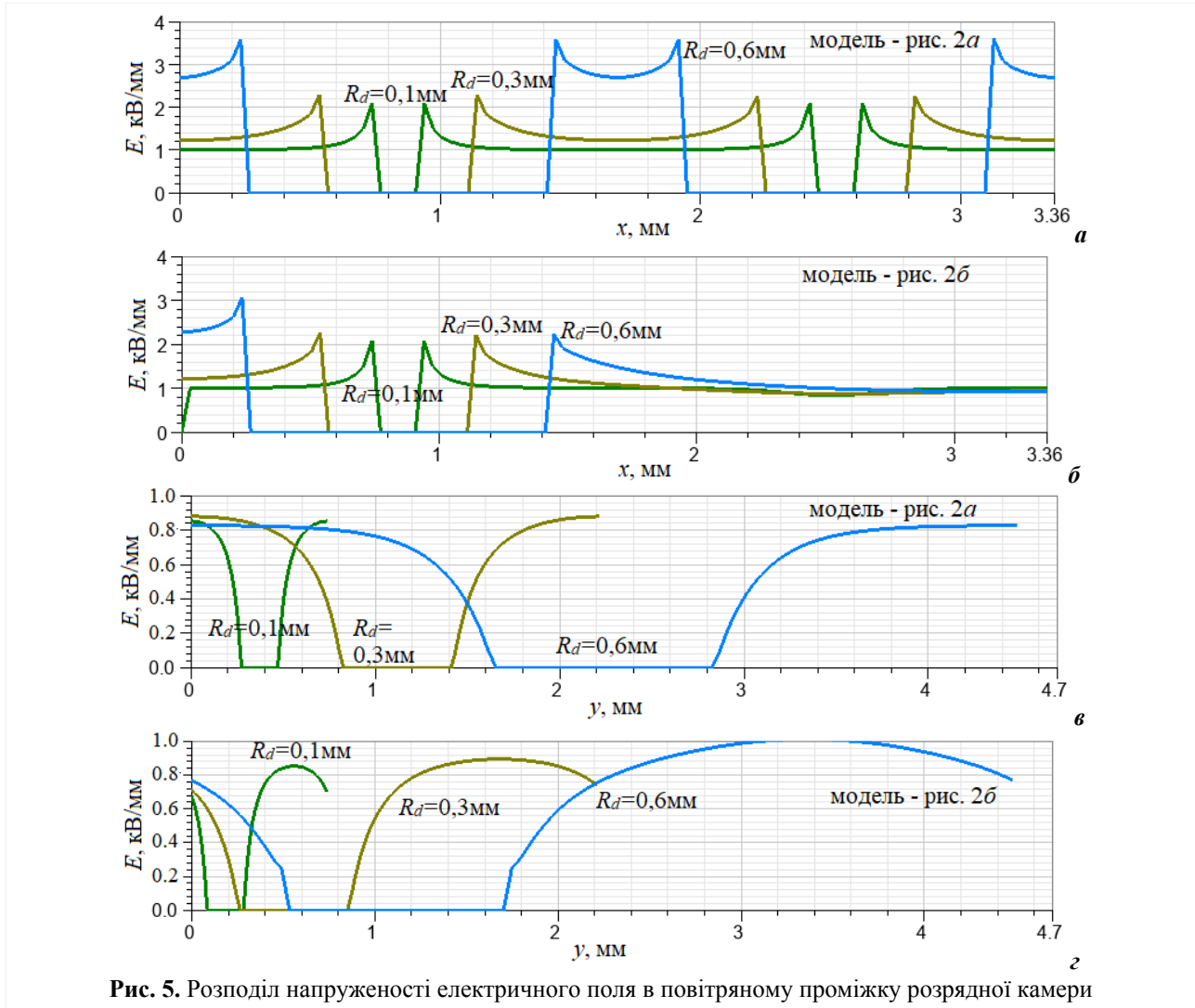


Рис. 5. Розподіл напруженості електричного поля в повітряному проміжку розрядної камери

На рис. 6 зображено результат розрахунку електричної сили F_x (складова сили за координатою x), що діє на поверхню l краплини, яка знаходиться біля плівки 4 на рис. 2:

$$F_x = \oint_l \mathbf{n} \mathbf{T}_{\mathbf{x}\mathbf{n}} dl = \oint_l (T_{xx} \cos(\mathbf{n}, x) + T_{xy} \cos(\mathbf{n}, y)) dl, \quad (17)$$

$$T_{xx} = \varepsilon_0 \left(E_x^2 - \frac{E^2}{2} \right), \quad T_{xy} = \varepsilon_0 E_x E_y,$$

де T_{xx} та T_{xy} – компоненти тензора напружень Максвелла [17], $\cos(\mathbf{n}, x)$ та $\cos(\mathbf{n}, y)$ – косинуси кутів між нормаллю $\mathbf{n}$ до поверхні краплини і осями x та y відповідно, dl – елемент довжи-

ни поверхні краплини у двовимірній моделі (рис. 2), що еквівалентно площі поверхні при $z=1$ м. Для моделі на рис. 2 а сила F_x , що діє на краплину, урівноважена й рівна нулю (крива 1). Крива 2 на рис. 6 (модель на рис. 2 б) показує, що певна сила діє на краплину, якщо з обох боків від неї напруженість електричного поля різна (рис. 5 б).

Оскільки імпульсний бар'єрний розряд генерує НТП, що створює високоактивні частинки на поверхні води – на межі “газ (повітря) – рідина” [18], виконано порівняння середнього значення напруженості електричного поля на поверхні води (рис. 7):

$$E_w = \frac{1}{l} \int_l |\mathbf{E}| dl, \quad (18)$$

де l – лінія на межі “газ–рідина” (рис. 2). Тут криві 1 та 2 – відповідна модель без зміщення краплин за y (рис. 2 а) та зі зміщенням (рис. 2 б). На поверхні краплин середня напруженість електричного поля є більшою порівняно з плівками (рис. 7), причиною чого є округлі форми краплин, які концентрують напрямок силових ліній напруженості електричного поля $\mathbf{E}$ на свою поверхню. Тому на поверхні краплин середня напруженість є на 20 % більшою незалежно від радіуса краплин (рис. 7). Тут, як і на рис. 6 і 4, криві під номером 2 мають більшу величину за радіуса краплин від 0,3 мм і більше, що пояснюється наближеністю крапель до краю повітряного проміжку (рис. 5 а).

Отже, за умови однакового середнього значення напруженості електричного поля в повітряному проміжку з одного боку збільшення радіусу краплин призводить до збільшення напруженості електричного поля на поверхні води (рис. 7; 5 а, б), напруги на електродах (рис. 3) та ємності РК (рис. 4), з іншого – краплини з радіусом понад 0,3 мм, що відповідає $1/3 d_g$, будуть притягуватися до стінок (плівок води) повітряного проміжку (рис. 6), оскільки розподіл напруженості поля в повітряному проміжку стає суттєвіше неоднорідним (рис. 5). Тому, зважаючи на формулу (8), запропоновано такий вираз для визначення оптимальної площі (об'єму) краплин води, що одночасно знаходяться і рівномірно розподілені в повітряному проміжку двовимірної моделі РК (рис. 1) на одиницю довжини за координатою y :

$$S_w = \frac{\pi r_d' d_g}{2\sqrt{\gamma/(1-\sqrt{\beta})}}, \quad (19)$$

де $r_d' = 1/6$ – рекомендована величина відносного радіусу (відносно d_g) найбільших краплин води (верхня частина РК на рис. 1), які можуть бути подані у проміжок РК. Для розрахованої площі (19) краплини, що рівномірно розподілені в проміжку, можуть мати будь-який радіус, але не більше r_d' . Також вираз (19) може бути використаний для випадку, якщо в РК (рис. 1) замість краплин знаходяться струмені води у напрямку координати z . Водночас слід ураховувати, що струмені води під час руху можуть перетворюватися на краплини, радіус яких стане більшим, наприклад, у 1,67 раза [16].

Висновки. Розроблено модель для розрахунку розподілу напруженості електричного поля в розрядній камері у двовимірній постановці з краплинами змінного радіусу, яка базується на рівнянні Лапласа та граничних умовах періодичності. Двовимірний модель забезпечує

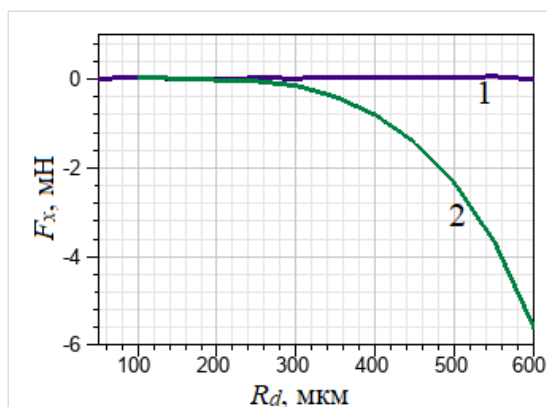


Рис. 6. Електрична сила, що діє на модель однієї з двох краплин

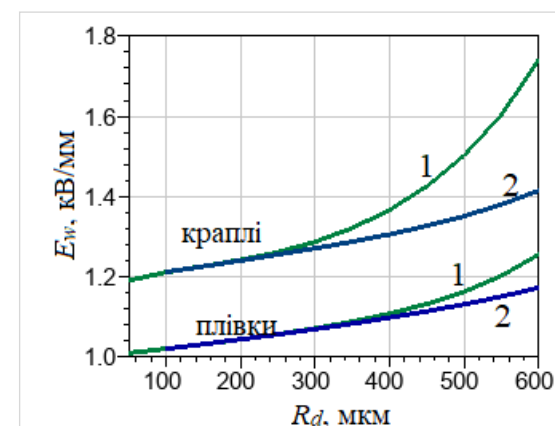


Рис. 7. Середня напруженість на поверхнях краплин і плівок

майже постійне ($\pm 3\%$) середнє значення напруженості поля в повітряному проміжку завдяки заданій напрузі на електродах і незмінну сумарну довжину границь краплина-повітря на 1 м довжини РК за умови мінімальної взаємодії сусідніх крапель у повітряному проміжку РК. У розробленій моделі в перерахунку на одиницю довжини РК енергія електричного поля практично не залежить від радіусу крапель, а електрична ємність та об'єм води крапель змінюються лінійно від їхнього радіусу.

За відносного радіуса крапель менше $1/6$ відносно ширини повітряного проміжку, що припадає на одну краплину, підсилення напруженості поля спостерігається лише поблизу поверхні крапель. За радіуса від $1/6$ до $2/6$ напруженість поля в 1–2 рази підсилюється на всю ширину між краплинами та краєм повітряного проміжку, що призводить до збільшення ємності, накопичення енергії та неоднорідності напруженості електричного поля. Такі краплі зазнають впливу сил електричного поля за мінімальної несиметрії їхнього розміщення за шириною повітряного проміжку.

Використання крапель у повітряному проміжку разом із водяними плівками дає змогу одержати більшу контактну поверхню води з іонізованим повітрям під час очищення води бар'єрними розрядами, водночас середня напруженість поля на поверхні крапель на 20 % вища, ніж на плівках. Це може сприяти збільшенню кількості хімічно активних частинок, що утворюються внаслідок дії НТП у повітряному проміжку.

Запропоновано вираз для розрахунку оптимальної площі (об'єму) крапель або струменів води на одиницю довжини в двовимірній моделі РК за умови, що краплі рівномірно розподілені в повітряному проміжку та мають розрахунковий максимальний радіус, що не перевищує $1/6$ ширини повітряного проміжку. Конкретний радіус крапель або струменів за незмінної площі (об'єму) краплин може бути уточнений на основі експериментальних досліджень.

Роботу виконано за темою "Визначення конструктивних і режимних параметрів електродної системи модульного типу для здійснення бар'єрного розряду на рідину, що знаходиться в краплинно-плівковому стані". (шифр "Електрокрапля"), державний реєстраційний номер 0123U103013.

1. Bereka V., Boshko I., Kondratenko I., Zabulonov Y., Charnyi, D. Onanko Y., Marynin A., Krasnoholovets V. Efficiency of plasma treatment of water contaminated with persistent organic molecules. *Journal of Environmental Engineering and Science*. 2021. Vol. 16. Pp. 40–47. DOI: <https://doi.org/10.1680/jenes.20.00028>
2. Yangju Li, Haoran Dong, Junyang Xiao, Long Li, Dongdong Chu, Xiuzhen Hou, Shuxue Xiang, Qixia Dong, Haoxuan Zhang, Advanced oxidation processes for water purification using percarbonate: insights into oxidation mechanisms, challenges, and enhancing strategies. *Journal of Hazardous Materials*. 2023. Vol. 442. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.130014>
3. Chuan Pu, Gang Lu, Hang Qi, Abdalgali B. Isaev, Mingshan Zhu, Enhanced persulfate activation process by magnetically separable catalysts for water purification: a review. *Chinese Journal of Structural Chemistry*. 2023. Vol. 42. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cjsc.2023.100093>
4. Soomro, Faheeda, Fida Hussain Memon, Muhammad Ali Khan, Muzaffar Iqbal, Aliya Ibrar, Ayaz Ali Memon, Jong Hwan Lim, Kyung Hyon Choi, and Khalid Hussain Thebo, Ultrathin graphene oxide-based nanocomposite membranes for water purification. *Membranes*. 2023. No 13. Pp. 64. DOI: <https://doi.org/10.3390/membranes13010064>
5. Jiang, J. Zheng, S. Qiu, M. Wu, Review on electrical discharge plasma technology for wastewater remediation. *Chemical Engineering Journal*. 2014. No 236. Pp. 348–368. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.09.090>
6. Ahmed Yusuf, Hussein Kehinde Amusa, Jamiu Olanrewaju Eniola, Adewale Giwa, Oluwadamilola Pikuda, Abdallah Dindi, Muhammad Roil Bilad, Hazardous and emerging contaminants removal from water by plasma-based treatment: a review of recent advances, *Chemical Engineering Journal Advances*. 2023. Vol. 14. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.100443>
7. Берека В.О., Кондратенко І.П. Електророзрядні технології обробки води та критерії доцільності їх використання. *Праці ІЕД НАН України*. 2021. Вип. 58. С. 90–100. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2021.58.090>
8. Бобкова Е.С., Гриневиц В.И., Исакина А.А., Рыбкин В.В. Разложение органических соединений в водных растворах под действием электрических разрядов атмосферного давления. *Химия и химическая технология*. 2011. Том 54. Вып. 6. С. 3–17.
9. Yexiang Yang, Yongchun Wang, Wenxuan Jiang, He Guo. Efficient degradation of bisphenol A by a novel ternary synergistic dielectric barrier discharge plasma advanced oxidation process: the role of peracetic acid and ferrous ions. *Separation and Purification Technology*. 2024. Vol. 354. Part 8. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.129568>

10. Tsuomu Kobayash, Taichi Sugai, Taiki Hanga, Yoshi Minamitani, Taisuke Nose. The effect of spraying of water droplets and location of water droplets on the water treatment by pulsed discharge in air. *IEEE transactions on plasma science*. 2010. Vol. 38. No 10. Pp. 2675–2680. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TPS.2010.2047842>
11. Божко І., Кобильчак В. Обробка імпульсним бар'єрним розрядом води в крапельному стані. *Технічна електродинаміка*. 2015. № 3. С. 60–66.
12. Берека В.О., Васецький Ю.М., Кондратенко І.П., Вплив з'єднувального високовольтного кабелю на струми і напруги у пристрої імпульсного бар'єрного розряду. *Технічна електродинаміка*. 2024. № 4. С. 16–23. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2024.04.016>
13. Карпов Ю.О., Ведміцький Ю.Г., Кухарчук В.В., Теоретичні основи електротехніки. Електромагнітне поле: Підручник. Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008. 407 с.
14. Берека В.О., Божко І.В., Карлов О.М., Кондратенко І.П. Обробка водного розчину метиленової сині в краплино-плівковому стані імпульсним бар'єрним розрядом. *Технічна електродинаміка*. 2022. № 1. С. 67–74. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2022.01.067>
15. Берека В.О., Божко І.В., Бржезицький В.О., Гаран Я.О, Троценко Є.А. Моделювання електричного поля в електродній системі задля створення імпульсного бар'єрного розряду в атмосферному повітрі за присутності води в краплинно-плівковому стані. *Технічна електродинаміка*. 2020. № 2. С.17–22. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2020.02.017>
16. Божко І., Берека В. Однорідність імпульсного бар'єрного розряду в атмосферному повітрі за присутності води в краплинно-плівковому стані. *Технічна електродинаміка*. 2019. № 5. С. 17–20. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.05.017>
17. Тамм І.Е. Основы теории электричества. М.: Наука, 1976. 616 с.
18. Божко І., Кондратенко І. Ефективність обробки водного розчину метиленової сині імпульсним бар'єрним розрядом на його поверхню. *Технічна електродинаміка*. 2018. № 6. С. 89–97. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2018.06.089>

ELECTROSTATIC FIELD IN A BARRIER DISCHARGE CHAMBER FOR WATER PURIFICATION CONSIDERING INDIVIDUAL WATER DROPLETS

R.S. Kryshchuk

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,

Beresteiskiy Ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine

e-mail: dygogive@gmail.com

The use of pulsed dielectric barrier discharge (DBD) for water purification via low-temperature plasma (LTP) is a promising technology. DBD enables the purification of water in a droplet-film state from organic contaminants by generating highly reactive molecules (OH radicals, O, H₂O₂, and O₃ molecules) produced in LTP upon contact with water. A two-dimensional model was developed to calculate the electrostatic field in the DBD discharge chamber (DC), which includes two electrodes, a dielectric barrier, two water droplets or streams in the air gap, and water films. The model employs Laplace's equation for the electrostatic field with periodic boundary conditions. Expressions were proposed for determining the length of the symmetric part of the DC and setting the voltage on the electrodes with a constant droplet surface area and a constant average electric field intensity in the air gap, independent of droplet radius. The study investigates the dependence of the electrostatic field energy and DC capacitance on the droplet radius and their mutual positioning along the DC length. Changes in electrode voltage and droplet density per unit DC length relative to droplet radius are demonstrated. An analysis of the electric field distribution, DC capacitance, and stored energy was conducted. The average electric field intensity on the surfaces of droplets and water films was examined. The electric forces acting on the droplets were determined using Maxwell's stress tensor. An expression was derived for calculating the recommended amount of water in the form of droplets or streams per unit dimensions of the DC to achieve a more uniform distribution of the electric field intensity within the DC and to minimize the impact of electric forces on the droplets. Ref. 18, fig. 7.

Keywords: barrier discharge, mathematical model, size optimization, electrostatic field, discharge chamber, water purification.

1. Bereka V., Boshko I., Kondratenko I., Zabulonov Y., Charnyi D., Onanko Y., Marynin A., Krasnoholovets V., Efficiency of plasma treatment of water contaminated with persistent organic molecules. *Journal of Environmental Engineering and Science*. 2021. Vol. 16. Pp. 40–47. DOI: <https://doi.org/10.1680/jenes.20.00028> (Ukr)
2. Yangju Li, Haoran Dong, Junyang Xiao, Long Li, Dongdong Chu, Xiuzhen Hou, Shuxue Xiang, Qixia Dong, Haoxuan Zhang, Advanced oxidation processes for water purification using percarbonate: insights into oxidation mechanisms, challenges, and enhancing strategies. *Journal of Hazardous Materials*. 2023. Vol. 442. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.130014>
3. Chuan Pu, Gang Lu, Hang Qi, Abdulgalim B. Isaev, Mingshan Zhu, Enhanced persulfate activation process by magnetically separable catalysts for water purification: a review. *Chinese Journal of Structural Chemistry*. 2023. Vol. 42. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cjsc.2023.100093>
4. Soomro, Faheeda, Fida Hussain Memon, Muhammad Ali Khan, Muzaffar Iqbal, Aliya Ibrar, Ayaz Ali Memon, Jong Hwan Lim, Kyung Hyon Choi, and Khalid Hussain Thebo, Ultrathin graphene oxide-based nanocompo-

- site membranes for water purification. *Membranes*. 2023. No 13. Pp. 64. DOI: <https://doi.org/10.3390/membranes13010064>
5. Jiang, J. Zheng, S. Qiu, M. Wu, Review on electrical discharge plasma technology for wastewater remediation. *Chemical Engineering Journal*. 2014. No 236. Pp. 348–368. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.09.090>
 6. Ahmed Yusuf, Hussein Kehinde Amusa, Jamiu Olanrewaju Eniola, Adewale Giwa, Oluwadamilola Pikuda, Abdallah Dindi, Muhammad Roil Bilad, Hazardous and emerging contaminants removal from water by plasma-based treatment: a review of recent advances, *Chemical Engineering Journal Advances*. 2023. Vol. 14. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.100443>
 7. Bereka, V.O., Kondratenko I.P. Elektrodisharge technologies of water treatment and criteria for their feasibility. *Pratsi IED NAN Ukrainy*. 2021. Issue 58. Pp. 90–100. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2021.58.090> (Ukr)
 8. Bobkova E.S., Grinevich V.I., Isakina, A.A., Rybkin V.V. Decomposition of organic compounds in aqueous solutions under the action of atmospheric pressure electric discharges. *Khimia i Khimicheskaya Tekhnologiya*. 2011. Vol. 54. Issue 6. Pp. 3–17. (Rus)
 9. Yexiang Yang, Yongchun Wang, Wenxuan Jiang, He Guo, Efficient degradation of bisphenol A by a novel ternary synergistic dielectric barrier discharge plasma advanced oxidation process: the role of peracetic acid and ferrous ions. *Separation and Purification Technology*. 2024. Vol. 354. Part 8. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.129568>
 10. Tsuomu Kobayash, Taichi Sugai, Taiki Hanga, Yoshi Minamitani, Taisuke Nose. The effect of spraying of water droplets and location of water droplets on the water treatment by pulsed discharge in air. *IEEE transactions on plasma science*. 2010. Vol. 38. No 10. Pp. 2675–2680. DOI: <https://dx.doi.org/10.1109/TPS.2010.2047842>
 11. Bozhko I., Kobylchak V. Water treatment in the state of drops by pulse barrier discharge. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2015. No. 3. Pp. 60–66. URI: <https://techned.org.ua/index.php/techned/article/view/931> (Ukr)
 12. Bereka V.O., Vasetskyi Yu.M., Kondratenko I.P., Influence of high-voltage connecting cable on currents and voltages in the impulse barrier discharge device. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2024. No. 4. Pp. 16–23. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2024.04.016> (Ukr)
 13. Karpov Yu.O., Vedmitskyi Yu.H., Kukharchuk V.V. Theoretical foundations of electrical engineering. electromagnetic field. Vinnytsia: UNIVERSUM-Vinnytsia, 2008. 407 p. (Ukr)
 14. Bereka V.O., Bozhko I.V., Karlov O.M., Kondratenko I.P., Treatment of methylene blue solution in droplet-film state by impulse barrier discharge. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2022. No. 1. Pp. 67–74. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2022.01.067> (Ukr)
 15. Bereka V.O., Bozhko I.V., Brzhezitskyi V.O., Haran Ya.O., Trotsenko Ye.A., Modeling of electric field in the electrode system for creating impulse barrier discharge in atmospheric air with water in droplet-film state. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2020. No. 2. Pp. 17–22. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2020.02.017> (Ukr)
 16. Bozhko I., Bereka V. Uniform of pulse barrier discharge in the air of atmospheric pressure in the presence of water in a drop-film condition. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2019. No. 5. Pp. 17–20. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.05.017> (Ukr)
 17. Tamm I.E. Theory of electricity. M.: Nauka, 1976. 616 p. (Rus)
 18. Bozhko I., Kondratenko I. Efficiency of treatment of aqueous solution of methylene blue via exposure to pulse dielectric barrier discharge to the surface. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2018. No 6. Pp. 89–97. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2018.06.089> (Ukr)

Надійшла: 17.10.2024

Прийнята: 20.11.2024

Submitted: 17.10.2024

Accepted: 20.11.2024