

ЕЛЕКТРОСТАТИЧНЕ ПОЛЕ В ПОВІТРЯНОМУ ПРОМІЖКУ СИСТЕМИ ПЛОСКО-ПАРАЛЕЛЬНИХ ЕЛЕКТРОДІВ ДЛЯ ОБРОБКИ КРАПЕЛЬ ВОДИ БАР'ЄРНИМ РОЗРЯДОМ

Р.С. Крищук*, канд. техн. наук, В.О. Берека**, докт. філос.

Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна.

E-mail: dygogive@gmail.com; bereka.v@ukr.net.

Досліджується електростатичне поле в розрядній камері (РК), що призначена для очищення води від органічних забруднювачів за допомогою технології імпульсного бар'єрного розряду (ІБР). РК складається з вертикальних плоско-паралельних електродів, між якими знаходиться повітряний проміжок з краплинами води, а один з електродів ізольований діелектриком (бар'єр) від повітряного проміжку. Для виконання досліджень використовується комп'ютерне моделювання в двовимірній та тривимірній постановці. Метою роботи є порівняння розподілу напруженості електростатичного поля ІБР в повітряному проміжку та електричної ємності РК для встановлення оптимальної відстані між краплинами, визначення похибки розрахунку з використанням двовимірної постановки моделі РК. Виконано моделювання електростатичного поля з використанням рівняння Пуассона та методу скінченних елементів. Розрахунки виконані для двовимірної та тривимірної моделей за умов діаметру краплин 1 мм, довжини газового проміжку 3,36 мм та поданої напруги 3 кВ. Проведено дослідження впливу електропровідності краплин, а також відстані між ними на характеристики електростатичного поля бар'єрного розряду в об'ємі газового середовища, а також в об'ємі краплин. Проведено порівняння розрахованих значень електричної ємності РК в двовимірній та тривимірній моделях залежно від відстані між краплинами. Результати досліджень можуть бути використані під час застосування електророзрядної технології на основі імпульсного бар'єрного розряду в комплексах для обробки води, а саме при виборі параметрів руху оброблюваної рідини в плазмовій зоні. Бібл. 10, рис. 7.

Ключові слова: математична модель, електростатика, напруженість електричного поля, очищення води, бар'єрний розряд.

Вступ. Внаслідок стрімкого розвитку промисловості людство зіштовхнулося з проблемою нових органічних забруднювачів (EOPs або *emerging organic pollutants*), до яких відносять стійкі органічні забруднювачі (СОЗ) [1]. СОЗ можуть переноситися повітрям та водою (стічні та побутові стоки, ріки тощо), через що потрапляють до зовнішнього середовища. СОЗ є вкрай шкідливими для екосистеми через їхню токсичність, а також стійкість до більшості традиційних методів обробки води. Однак протягом останніх десятиліть активно досліджуються технології генерації хімічно активних частинок, таких як радикали ОН, О, молекули H_2O_2 , O_3 , які здатні руйнувати стійкі СОЗ (зазвичай побудовані на основі бензольних кілець) та доводити їх до повної мінералізації. Такі технології отримали загальну назву «розвинені окисні технології» (AOT's – *advanced oxidation technologies*) і характеризуються тим, що генерація хімічно активних сполук з великими окисними потенціалами відбувається в неврівноваженій низькотемпературній плазмі електричного розряду за атмосферним тиском оточуючого повітря на границі розподілу плазми і водного середовища. Електричні розряди широко використовуються у різних сферах, включаючи сільське господарство [2], медичну обробку [3, 4], обробку води та вихлопних газів [5], покращення якості повітря та його дезодорацію [6]. Зважаючи на необхідність збереження чистого довкілля і вразливість водних екосистем до токсичних органічних забруднень, дослідження технологій очищення промислових стоків з СОЗ із застосуванням AOT's для оброблення води є актуальним завданням.

Одним із найефективніших видів AOT's є електророзрядна технологія з низькотемпературною плазмою на основі імпульсних бар'єрних розрядів (ІБР). Задля реалізації ІБР використовується електродна система з повітряним (газовим) проміжком між двома електродами, на які подається імпульсна напруга у вигляді коротких уніполярних імпульсів. Задля підтримання

© Крищук Р.С., Берека В.О., 2025

ORCID: * <https://orcid.org/0000-0002-1933-0144>; ** <https://orcid.org/0000-0003-0888-2864>

© Видавець Інститут електродинаміки НАН України, 2025



Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk>

переважно лавинного типу розряду з генерацією низькотемпературної плазми один з електродів електрично ізольований діелектриком, який має назву *бар'єр*. Тому наявність струму через повітряний проміжок можливо лише за змінної в часі напруги, а величина струму залежить від швидкості зміни напруги. Систему плоскопаралельних електродів з повітряним проміжком будемо називати *розрядною камерою* (РК).

Руйнування СОЗ найбільш ефективно здійснюється на поверхні води, що межує з плазмою [7], де виконується утворення найбільшої кількості хімічно активних частинок. Тому ефективність очищення води підвищується, якщо максимальна площа поверхні забрудненої води оточена низькотемпературною плазмою, що досягається у разі поділу об'єму води на маленькі порції у вигляді краплин, які розміщені безпосередньо в зоні дії низькотемпературної плазми.

Приймаючи до уваги високу ефективність ІБР для очищення води, слід врахувати особливість технології – велику потребу в електричній енергії на промисловому рівні, особливо якщо ця технологія неоптимізована. Енергія витрачається в основному під час перетворення низької напруги у високу імпульсну напругу задля створення сильного електричного поля в плазмовій зоні РК, щоб досягати десятків кВ/см напруженості електричного поля [7]. Тому необхідно всебічно підвищувати енергоефективність ІБР, зокрема через оптимізацію подачі забрудненої води у повітряний проміжок РК та оптимізацію джерела живлення [7].

Відомо, що крапля води різко змінює електричне поле в міжелектродному проміжку (перетворюючи однорідне поле на неоднорідне), напруженість поля на бокових поверхнях краплин збільшується втричі [8], [9], що впливає на початкову напругу, за якій буде виникати розряд в повітряному проміжку РК, а також на тривалість часу існування плазми у порівнянні з тривалістю імпульсу напруги. Зміна відстані між вертикально падаючими краплинами у повітряному проміжку може впливати на локальне підсилення напруженості електричного поля. Таким чином, регулюючи відстань між краплинами, можливо збільшити енергоефективність ІБР, яку можна оцінити так: оброблення одиниці об'єму води відносно кількості затраченої енергії [7]. Вода вважається очищеною, якщо в ній органічні сполучення перетворилися на мінеральні речовини, які випадають в осад.

Задля дослідження залежності розподілу електростатичного поля від відстані між краплинами можна використовувати комп'ютерне моделювання розрядної камери (РК), що складається з електродів, діелектрика, повітря та води [10]. Двовимірна постановка моделі не враховує реальну геометрію краплин води, що може суттєво впливати на точність розрахунків електричних параметрів розрядної камери, зокрема електричної ємності, а також на розподіл і інтенсивність напруженості електричного поля в повітряному проміжку, зокрема поблизу поверхні води. Визначена електрична ємність ϵ , зі свого боку, одним з параметрів для моделювання електричної схеми, що використовується для узгодження параметрів джерела живлення з параметрами РК [7].

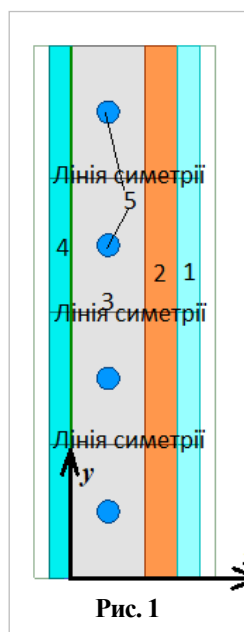


Рис. 1

Порівняння розподілу та інтенсивності напруженості електростатичного поля у тривимірній та двовимірній постановках надасть можливість оцінити похибку моделювання у разі двовимірної постановки. Дослідження залежності відстані між краплинами води в повітряному проміжку дає змогу встановити оптимальну кількість краплин (по суті витрати рідини) на основі аналізу локального підсилення напруженості електричного поля та підвищити енергоефективність очищення води.

Метою роботи є порівняння розподілу напруженості електростатичного поля ІБР в повітряному проміжку та електричної ємності РК задля встановлення оптимальної відстані між краплинами, визначення похибки розрахунку з використанням двовимірної постановки моделі РК.

Розрахункова модель розрядної камери (РК) для моделювання електричного поля методом скінченних елементів показана на рис. 1. Краплини розміщені у повітряному проміжку у вертикальному ряду з певним інтервалом, що дає змогу поділити РК на симетричні частини. Основні компоненти включають: 1 – анод, до якого прикладається висока напруга; 2 – діелектрик (*бар'єр*); 3 – повітряний проміжок; 4 – заземлений катод; 5 – вода у формі кулі.

На рис. 1 представлено двовимірну постановку задачі, яка інтерпретується на рис. 2 у тривимірній постановці. Очевидно, що в двовимірній моделі неможливо

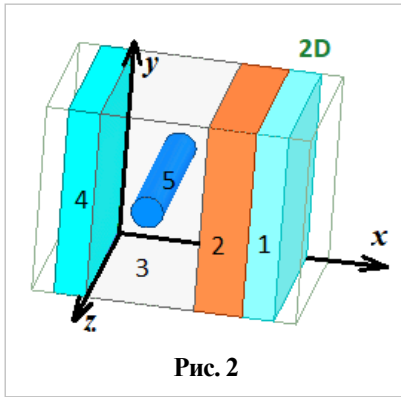


Рис. 2

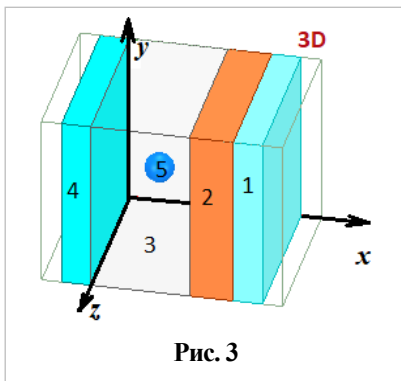


Рис. 3

точно відтворити геометричну фігуру краплини (куля), тому у двовимірній постановці краплини зображені у формі циліндрів уздовж координати z , як показано на рис. 2. На рис. 3 демонструється ескіз симетричної частини розрядної камери у тривимірній постановці, де краплина має форму кулі. Це ілюструє, що об'єм води у двовимірному представленні значно відрізняється від тривимірного представлення.

Задля визначення розподілу електростатичного поля застосовується основне рівняння електростатики — рівняння Пуассона [9]

$$\nabla \cdot (\varepsilon_0 \varepsilon_r \nabla \varphi) = -\rho, \Rightarrow \Delta \varphi = -\rho / \varepsilon_a, \quad \varepsilon_a = \varepsilon_0 \varepsilon_r. \quad (1)$$

Тут φ — електричний потенціал відображає потенціальну енергію для переміщення заряду; $\nabla \varphi$ — градієнт електричного потенціалу; $\nabla \cdot$ — дивергенція; Δ — оператор Лапласа [9]; ρ — об'ємна густина заряду; ε_0 — електрична стала; ε_r — відносна діелектрична проникність; ε_a — абсолютна діелектрична проникність. Зв'язок між векторами напруженості, індукції електричного поля та електричним потенціалом

$$\mathbf{E} = -\nabla \varphi, \quad \mathbf{D} = \varepsilon_a \mathbf{E}. \quad (2)$$

Для моделювання РК використовується симетрична модель (рис. 2 та рис. 3) з однією краплиною, що обмежена лініями симетрії (рис. 1), які перпендикулярні до координати y . На лініях симетрії вектор напруженості електричного поля E має дотичну (тангенціальну τ) складову, а нормальна складова n , яка співпадає з координатою y , відсутня

$$E_\tau^+ = E_\tau^- \neq 0, \quad E_n^+ = E_n^- = 0. \quad (3)$$

На зовнішніх границях повітряної області, що на певній відстані від електродів, задається гранична умова електричної ізоляції, тобто поверхнева густина заряду σ рівна нулю. Оскільки за умовою вільні заряди в областях моделі 1...5 (рис. 1–3) відсутні ($\rho = 0$), то рівняння (1) в кожній області моделі на рис. 1 і 2 має вигляд [9]

$$\Delta \varphi = 0. \quad (4)$$

На поверхнях провідників виконується гранична умова провідник–діелектрик

$$D_n^+ = \sigma, \quad (5)$$

де D_n^+ — нормальна складова індукції на границі провідник–діелектрик зі сторони діелектрика; σ — поверхнева густина заряду, Кл/м². З урахуванням (5) заряд на поверхні s границі провідник–діелектрик може бути розрахований за виразом

$$q = \int_s D_n^+ ds, \quad (6)$$

У процесі імпульсного бар'єрного розряду в розрядній камері із зростанням напруженості електричного поля у повітряному проміжку виникає іонізація і перенесення негативних зарядів від катоду 4 через проміжок 3 до діелектричного бар'єру 2 (рис. 1). Таким чином діелектричний бар'єр може бути заряджений [7]. Проте під час низькотемпературного розряду напруга на повітряному проміжку (між катодом та бар'єром) відповідає розрядній напрузі під час тривання розряду. Приймається гранична умова, що бар'єр не заряджений, тобто між повітрям 3 та діелектриком 2 поверхневі заряди відсутні [9]

$$D_n^+ - D_n^- = 0. \quad (7)$$

У РК між двома електрично провідними електродами 1 і 4 знаходиться подвійний діелектрик (рис. 1): повітряний проміжок 3 з краплинами води 5 та бар'єр 2. На поверхнях електродів 1 та 4, що межують з подвійним діелектриком може накопичуватися заряд. Наявність краплини води створює неоднорідне електричне поле в діелектрику. Електрична ємність подвійного діелектрика або кожного діелектрика окремо, розраховується за виразом [9]

$$C = \frac{q}{U_m} = \frac{2W_E}{U_m^2} = \frac{1}{U_m^2} \int (\mathbf{E} \cdot \mathbf{D}) d\Omega, \quad (8)$$

Тут U_m – напруга між протилежними поверхнями діелектрика; W_E – енергія електричного поля; q – заряд; Ω – об'єм діелектрика. Якщо розрядна камера без краплин води, то електричне поле є однорідне, і ємність газового проміжку або ємність діелектричного бар'єру може бути розрахована так

$$C = \frac{s_{yz} \cdot \epsilon_a}{l_x}, \quad (9)$$

де s_{yz} – площа протилежних поверхонь діелектрика в площині yOz ; l_x – товщина газового проміжку або діелектричного бар'єру по координаті x (рис. 1).

Задля виконання розрахунків розподілу напруженості електростатичного поля обрано ширину скляного бар'єру 1,5 мм, повітряного проміжку – 3,36 мм, радіус краплин води становить 0,5 мм. Для позначення питомої електропровідності матеріалу використаємо символ κ (См/м). Катод приймаємо з нержавіючої сталі з електропровідністю $\kappa \neq 0$ та відносною діелектричною проникністю 1. Анод з алюмінієвого сплаву з такими ж параметрами. Анод та катод мають ширину 1 мм. Скляний бар'єр, який стоїть між анодом та повітряним проміжком, характеризується електропровідністю $\kappa = 0$ См/м та відносною діелектричною проникністю 5,5. Повітряний проміжок має електропровідність $\kappa = 0$ і відносно діелектричну проникність 1,0006. У моделі враховуються краплини води двох типів: одні без електричної провідності ($\kappa = 0$) См/м, інші – з електропровідністю ($\kappa \neq 0$). Відносна діелектрична проникність ϵ_r краплин води становить 81, що значно послаблює напруженість електричного поля в об'ємі води. Під час моделювання розподілу електричного поля задається електричний потенціал в аноді довільно, наприклад, 3 кВ [10], оскільки перехідні процеси та струми в РК не враховуються.

Якщо краплину води розмістити в однорідному електричному колі, то неоднорідне електричне поле навколо краплини та всередині краплини можна легко розрахувати аналітичним методом [9]. На бокових стінках краплини води (рис. 1) у двовимірній постановки моделі (рис. 2) індукція електричного поля D та напруженість E будуть мати в 1,98 од. [8, 9] більші значення в порівнянні з зовнішнім однорідним полем (без наявності краплин)

$$E_R/E_0^{(2D)} = D_R/D_0^{(2D)} = 1 + \frac{\epsilon_{a1} - \epsilon_{a2}}{\epsilon_{a1} + \epsilon_{a2}}, \quad (10)$$

а для тривимірної постановки (рис. 3) – в 2,95 од. –

$$E_R/E_0^{(3D)} = D_R/D_0^{(3D)} = 1 + 2 \frac{\epsilon_{a1} - \epsilon_{a2}}{\epsilon_{a1} + \epsilon_{a2}}. \quad (11)$$

Тут ϵ_{a1} , ϵ_{a2} – діелектрична проникність відповідно краплини та повітря; E_R , E_0 – напруженість електричного поля на боковій поверхні краплини та відповідно напруженість однорідного електричного поля. Індeksi 2D та 3D відносяться до рис. 2 та рис. 3 відповідно. Якщо краплини електропровідні ($\epsilon_{a1} \rightarrow \infty$), то відношення (10) та (11) будуть дорівнювати 2,00 та 3,00. Отже, на бокових поверхнях краплин води, що розміщені в однорідному полі, напруженість E та індукція D в 2,95...3 од. (1,98...2 од. у двовимірній постановці) буде більшою порівняно з однорідним електричним полем.

Всередині краплини напруженість E_1 та індукція D_1 розподілені рівномірно по всьому об'ємі і можуть бути розраховані відповідними виразами [9] за умови, що кожна краплина знаходиться в однорідному полі. Тоді відношення D_1/D_0 та E_1/E_0 можна знайти на основі [9]

$$E_1/E_0^{(2D)} = \frac{2\epsilon_{a2}}{\epsilon_{a1} + \epsilon_{a2}}, \quad D_1/D_0^{(2D)} = \frac{2\epsilon_{a1}}{\epsilon_{a1} + \epsilon_{a2}}, \quad (12)$$

$$E_1/E_0^{(3D)} = \frac{3\epsilon_{a2}}{\epsilon_{a1} + 2\epsilon_{a2}}, \quad D_1/D_0^{(3D)} = \frac{3\epsilon_{a1}}{\epsilon_{a1} + 2\epsilon_{a2}}. \quad (13)$$

Якщо краплина води є діелектрик ($\epsilon_{a1} = 81$), то за виразами (12) і (13) всередині краплини напруженість E_1 в 0,024 од. (рис. 2) і 0,036 од. (рис. 3) більша порівняно з однорідним полем, а індукція – в 1,98 та 2,93 од. У разі електропровідній краплині ($\epsilon_{a1} \rightarrow \infty$) індукція D_1 відповідно в 2 од. та 3 од. більша порівняно з D_0 , а напруженість E_1 рівна нулю. Отже, всередині краплин води напруженість E в 0,036...0 од. (0,024...0 од. у двовимірній моделі) буде більшою порівняно з однорідним електричним полем, а індукція D – в 2,95...3 (1,98...2) одиниць відповідно.

На рис. 4 показано розподіл напруженості електричного поля E по ширині повітряного проміжку вздовж координати x через центр краплини для тривимірної постановки моделі (рис. 3), розміри якої по координатах z та y однакові і становлять 4 мм. Такі розміри моделі є достатні, щоб кожна краплина була розміщена в однорідному електричному полі, як буде показано далі. Розрахунок виконано чисельним методом. На рис. 4 присутні 2 криві: краплина з електропровідністю $\kappa = 0$ та краплина з електропровідністю $\kappa > 0$. Якщо краплина електрично провідна, в ній напруженість

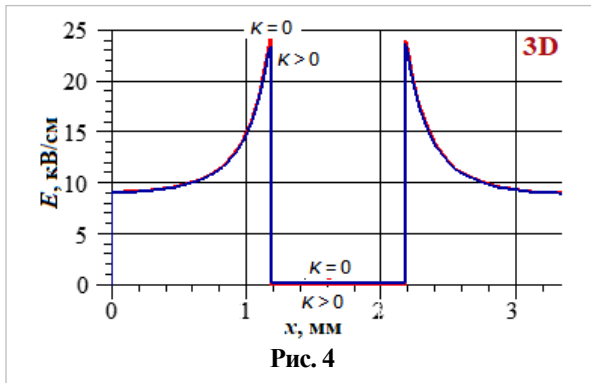


Рис. 4

дорівнює нулю. Видно, що на рис. 4 криві для провідної та непровідної краплин відрізняються несуттєво – в межах похибки. На краях повітряного проміжку – на катоді та бар’єрі – напруженість становить 9,1 кВ/см, що в 1,1 од. більше від однорідного поля, якщо б краплина була відсутня (8,25 кВ/см). На поверхні краплини напруженість майже в 3 рази більша порівняно з однорідним полем, що відповідає виразу (11). Якщо краплина діелектрик, в ній напруженість близька до нуля – 0,3 кВ/см, що відповідає виразу (13).
Якщо краплина електрично провідна (рис. 4), електрична ємність (8) повітряного проміжку становить $43,46 \cdot 10^{-15}$ Ф, бар’єру – $515,93 \cdot 10^{-15}$ Ф, ємність між електродами (послідовне з’єднання ємності проміжку та бар’єру) – $40,07 \cdot 10^{-15}$ Ф. За наявності непровідної краплини – відповідно $43,36 \cdot 10^{-15}$ Ф, $516,06 \cdot 10^{-15}$ Ф, $40,00 \cdot 10^{-15}$ Ф. Електрична провідність краплин води практично не впливає на електричну ємність РК. І при цьому ємність всієї розрядної камери за відсутності іонізації повітряного проміжку головним чином визначається ємністю повітряного проміжку – $40 \cdot 10^{-15}$ Ф. У разі іонізації повітряного проміжку – при протіканні імпульсного струму через повітряний проміжок – ємність розрядної камери буде визначатися ємністю бар’єру – $516 \cdot 10^{-15}$ Ф. При цьому напруга на бар’єрі буде відрізнятися від напруги на електродах на величину розрядної напруги повітряного проміжку. Під розрядною напругою будемо розуміти напругу між стінками повітряного проміжку, за якій настає протікання електричного струму через повітряний проміжок, яким заряджається та розряджається бар’єр під час очищення води.

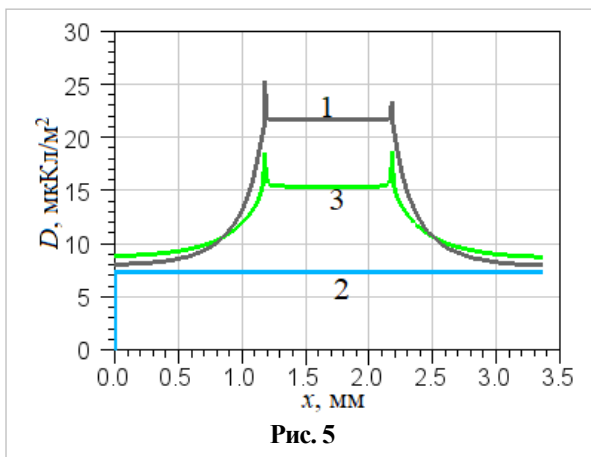


Рис. 5

На рис. 5 показано індукцію електричного поля, розраховану чисельним методом, яка дає змогу оцінити підсилення електричного поля в діелектричній краплині ($\kappa = 0$) та на її поверхні по горизонтальній осі, проведеної через центр краплини, як на рис. 4. Де 1 – тривимірна постановка моделі (рис. 3), 2 – однорідне поле без краплин, 3 – двовимірна постановка (рис. 2). В краплині в тривимірній постановці (крива 1 – рис. 5) індукція ($21,7$ мкКл/м²) в 2,96 од. більша порівняно з індукцією однорідного поля, що майже відповідає аналітичному методу – 2,95 од. (13). При цьому на бокових стінках повітряного проміжку ($x = 0$ мм та $x = 3,36$ мм) індукція підсилена в 1,1 од. – $8,0$ мкКл/м², як і напруженість (рис. 4). Тобто, діаметр краплини відносно ширини повітряного проміжку достатній для створення неоднорідного електричного поля по всій ширині проміжку. Індукція в краплині у двовимірній постановки моделі (рис. 5 – крива 3) становить $15,4$ мкКл/м², що в 2,1 од. більше порівняно з однорідним полем (крива 2), а має бути 1,98 за виразом (12) (похибка 5%). На краях краплини (рис. 5) маємо суттєве зростання індукції D електричного поля в порівнянні з індукцією всередині краплини, що не відповідає (10) та (11) і тому може бути віднесене до похибки. Тому у чисельному розрахунку розподілу напруженості електричного поля на поверхні краплин рекомендується перевірити адекватність моделі аналітичним методом розрахунку.

На рис. 6 показано розподіл напруженості електричного поля E для різних відстаней між краплями по вертикалі (рис. 1) для координати y та z , тривимірної і двовимірної моделей, а також

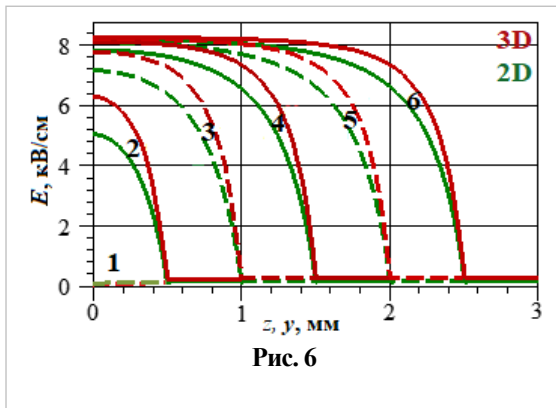


Рис. 6

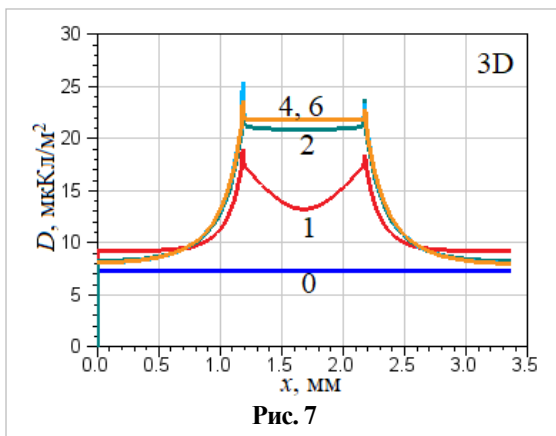


Рис. 7

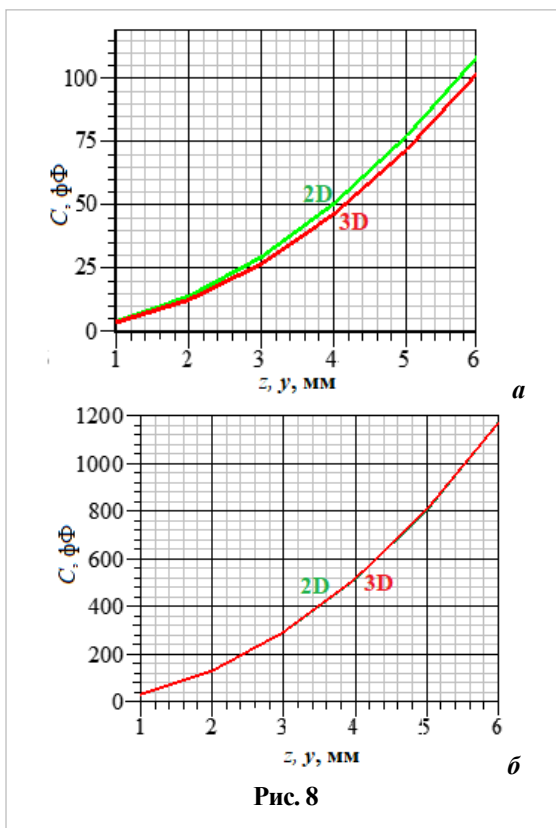


Рис. 8

шести варіантів розмірів по осям y та z – 1 мм, 2 мм, 3 мм, 4 мм, 5 мм та 6 мм, що відповідають індексам 1-6 на рис. 6. На рис. 7 – розподіл індукції електричного поля D по ширині повітряного проміжку з розмірами моделі по осям y та z – 1 мм, 2 мм, 4 мм, 6 мм, що відповідають індексам 1, 2, 4, 6. Індекс 0 – без наявності краплин.

Якщо розмір моделі становить 1 мм (рис. 6, крива 1), що дорівнює діаметру краплини, то між краплинами немає повітряного проміжку, і напруженість між краплинами по координатах y та z дорівнює нулю. При цьому індукція в краплині має найменше значення (рис. 7 – крива 1). Збільшення розміру моделі до 4 мм (рис. 6, рис. 7, криві 4) призводить до напруженості E між краплинами майже 8 кВ/см, що на 96% (11) відповідає напруженості однорідного поля (8,25 кВ/см). Збільшення відстані до 5 і 6 мм уже не призводить до суттєвого зростання напруженості між краплинами та індукції в краплинах. Отже, для моделі, що досліджується (рис. 1), при кроці між краплинами 4 мм досягається майже максимальна напруженість E між краплинами та оптимальна кількість краплин в повітряному проміжку. Тому можна припустити, що при кроці 4 мм буде здійснюватися максимальна іонізація повітря під час ІБР за максимальній кількості краплин. Потрібний крок розміщення краплин може досягатися завдяки зміні швидкості подачі краплин в РК, а також підбору величини тиску в камері подачі рідини, який додатково створюється допоміжним насосом.

На рис. 8 показано порівняння електричної ємності (8) повітряного проміжку (а) та бар'єру (б) в двовимірній (рис. 2) та тривимірній (рис. 3) постановках в залежності від зростання відстані між краплинами. Ємність залежить від площі електродів, тому зростання ємності на рис. 8 є нелінійне. Якщо відстані між краплинами становлять 4 мм, що за результатами на рис. 6 і 7 вибрано як оптимальні, то в двовимірній постановці ємність повітряного проміжку буде на 10% більшою, ніж у тривимірній (рис. 8, а). Присутність краплини в повітряному проміжку не впливає на ємність діелектричного бар'єру, тому на рис. 8, б дві криві однакові.

Висновки. Встановлено відстань між краплинами діаметром 1 мм, за якій досягається максимальна напруженість електричного поля E між ними, максимальна індукція електричного поля D всередині краплин та оптимальна по висоті повітряного проміжку кількість краплин в повітряному проміжку. Це дає змогу максимізувати площу поверхні води в повітряному проміжку і потенційно збільшити кількість корисних для очищення води активних

радикалів. Так, для краплин діаметром 1 мм встановлено, що за відстані між ними по вертикальній осі, паралельній площині електродів, більше 3 мм у тривимірній моделі напруженість в середній точці між краплинами на 94% відповідає однорідному електричному полю.

На бокових поверхнях краплин води, що розміщені в однорідному полі, напруженість E та індукція D в 2,95...3 од. (1,98...2 од. у двовимірній постановці) буде більшою порівняно з однорідним електричним полем. Всередині краплин води напруженість E в 0,036...0 од. (0,024...0 од. у двовимірній моделі) буде більшою порівняно з однорідним електричним полем, а індукція D – в 2,95...3 (1,98...2) одиниць відповідно.

Задля перевірки адекватності розрахунку чисельним методом рекомендується порівнювати показники напруженості та індукції електричного поля на поверхні краплини та всередині з результатами розрахунку аналітичним методом, коли краплина розміщена в однорідному електричному полі.

Електрична провідність краплин води в електростатичному полі практично не впливає на електричну ємність РК. Присутність краплини діаметром 1 мм в повітряному проміжку шириною 3,36 мм не впливає на ємність діелектричного бар'єру.

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" ("Електрокрапля", державний реєстраційний номер 0123U103013).

1. Yongjian He, Wenjiao Sang, Wei Lu, Wenbin Zhang, Cheng Zhan and Danni Jia. Recent Advances of Emerging Organic Pollutants Degradation in Environment by Non-Thermal Plasma Technology: A Review. *Water*. 2022. Vol. 14. Article no 1351. DOI: <https://doi.org/10.3390/w14091351>.
2. Misra N.N., Schluter O., Cullen P.J. Cold Plasma in Food and Agriculture. Waltham, MA, USA: Academic Press, 2016. 380 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801365-6.00001-9>.
3. Metelmann H.-R. von Woedtke T., Weltmann K.-D. Comprehensive Clinical Plasma Medicine. New York, USA: Springer International Publishing, 2018. 535 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-67627-2>.
4. Kolawole Adesina, Ta-Chun Lin, Yue-Wern Huang, Marek Locmelis, Daoru Han. A Review of Dielectric Barrier Discharge Cold Atmospheric Plasma for Surface Sterilization and Decontamination. *IEEE Transactions on Radiation and Plasma Medical Sciences*. 2024. Vol. 8. Issue 3. Pp. 235-306. DOI: <https://doi.org/10.1109/TRPMS.2024.3349571>.
5. Inhwan H., Jongku J., Taesuk Y., Jinmu J. Water electrode plasma discharge to enhance the bacterial inactivation in water. *Biotechnology and Biotechnological Equipment*. 2018. No 32. Pp. 530–534. DOI: <https://doi.org/10.1080/13102818.2017.1321969>.
6. Schmidt M., Holub M., Jogi I., Sikk M. Treatment of industrial exhaust gases by a dielectric barrier discharge. *The European Physical Journal Applied Physics*. 2016. No 2. Pp. 24708. DOI: <https://doi.org/10.1051/epjap/2016150554>.
7. Божко І.В., Карлов О.М., Кондратенко І.П., Чарний Д.В. Розробка комплексу для обробки води імпульсним бар'єрним розрядом. *Технічна електродинаміка*. 2017. № 6. С. 80-87. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2020.02.017>.
8. Васецький Ю.М. Електродинаміка. Основні поняття, потенціальні та квазістаціонарні поля: навч. посіб. К.: Вид-во Нац. авіац. ін-ту НАУ-друк, 2009. 160 с.
9. Карпов Ю.О., Ведміцький Ю.Г., Кухарчук В.В. Теоретичні основи електротехніки. Електромагнітне поле. Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008. 407 с.
10. Берека В.О., Божко І.В., Карлов О.М., Кондратенко І.П. Взаємоузгодження параметрів джерела живлення та робочої камери для обробки води імпульсним бар'єрним розрядом. *Технічна електродинаміка*. 2023. № 7. С. 81-88. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2023.04.081>.

ELECTROSTATIC FIELD IN THE AIR GAP OF A PLANE-PARALLEL ELECTRODE SYSTEM FOR WATER DROPLET TREATMENT USING BARRIER DISCHARGE TECHNOLOGY

R.O. Kryshchuk, V.O. Bereka

**Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,
Beresteiskyi Ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine.**

E-mail: dygogive@gmail.com; bereka.v@ukr.net.

This study investigates the electrostatic field in a discharge chamber (DC) designed for water purification from organic pollutants using pulsed barrier discharge (PBD) technology. The DC consists of vertical plane-parallel electrodes, with an air gap containing water droplets between them, and one of the electrodes is insulated from the air gap by a dielectric (barrier). The research employs computer modeling in both two-dimensional and three-dimensional setups. Therefore, the aim of this work is to compare the distribution of the electrostatic field intensity of PBD in the air gap

and the electrical capacitance of the DC to establish the optimal distance between droplets and to determine the calculation error using the two-dimensional DC model. Electrostatic field modeling was performed using the Poisson equation and the finite element method. Calculations were performed for two-dimensional and three-dimensional models with conditions of a droplet diameter of 1 mm, a gas gap length of 3.36 mm, and an applied voltage of 3 kV. The influence of droplet conductivity and the distance between them on the characteristics of the electrostatic field in the gas medium and in the droplets was investigated. A comparison of the calculated capacitance values of the DC in the two-dimensional and three-dimensional models depending on the distance between the droplets was conducted. The research results can be used in the application of electro-discharge technology based on pulsed barrier discharges in water treatment systems, specifically in selecting the parameters for the movement of the treated liquid in the plasma zone. References 10, figures 7.

Keywords: mathematical model, electrostatics, electric field intensity, water purification, barrier discharge.

1. Yongjian He, Wenjiao Sang, Wei Lu, Wenbin Zhang, Cheng Zhan and Danni Jia. Recent Advances of Emerging Organic Pollutants Degradation in Environment by Non-Thermal Plasma Technology: A Review. *Water*. 2022. Vol. 14. Article no 1351. DOI: <https://doi.org/10.3390/w14091351>.
2. Misra N.N., Schluter O., Cullen P.J. Cold Plasma in Food and Agriculture. Waltham, MA, USA: Academic Press, 2016. 380 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801365-6.00001-9>.
3. Metelmann H.-R. von Woedtke T., Weltmann K.-D. Comprehensive Clinical Plasma Medicine. New York, USA: Springer International Publishing, 2018. 535 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-67627-2>.
4. Kolawole Adesina, Ta-Chun Lin, Yue-Wern Huang, Marek Locmelis, Daoru Han. A Review of Dielectric Barrier Discharge Cold Atmospheric Plasma for Surface Sterilization and Decontamination. *IEEE Transactions on Radiation and Plasma Medical Sciences*. 2024. Vol. 8. Issue 3. Pp. 235-306. DOI: <https://doi.org/10.1109/TRPMS.2024.3349571>.
5. Inhwan H., Jongku J., Taesuk Y., Jinmu J. Water electrode plasma discharge to enhance the bacterial inactivation in water. *Biotechnology and Biotechnological Equipment*. 2018. No 32. Pp. 530–534. DOI: <https://doi.org/10.1080/13102818.2017.1321969>.
6. Schmidt M., Holub M., Jogi I., Sikk M. Treatment of industrial exhaust gases by a dielectric barrier discharge. *The European Physical Journal Applied Physics*. 2016. No 2. Pp. 24708. DOI: <https://doi.org/10.1051/epjap/2016150554>.
7. Bozhko I.V., Karlov O.M., Kondratenko I.P., Charnyi D.V. Development of a complex for water treatment with a pulsed barrier discharge. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2017. No 6. Pp. 80-87. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2020.02.017>. (Ukr)
8. Vasetskyi Y.M. Electrodynamics. Basic concepts, potential and quasi-stationary fields: teaching: manual. Kyiv: Vydavnytstvo Natsionalnoho aviatsionnoho universytetu NAU-Druk, 2009. 160 p. (Ukr)
9. Karpov Yu.O., Vedmitsky Yu.G., Kuharchuk V.V. Theoretical foundations of electrical engineering. Electromagnetic field: Vinnytsia: UNIVERSUM-Vinnytsia, 2008. 407 p. (Ukr)
10. Bereka I.V., Bozhko V.O., Brzhezytskyi Ya.O., Haran E.A. Trotsenko Simulation of the electric field in the electrode system to create of a pulsed barrier discharge in atmospheric air in the presence of water in the droplet-film state. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2020. No 2. Pp. 17-22. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2020.02.017>. (Ukr)

Надійшла 10.06.2024
Остаточний варіант 24.06.2024