

МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ В ЕЛЕКТРОДНІЙ СИСТЕМІ ЗАДЛЯ СТВОРЕННЯ ІМПУЛЬСНОГО БАР'ЄРНОГО РОЗРЯДУ В АТМОСФЕРНОМУ ПОВІТРІ ЗА ПРИСУТНОСТІ ВОДИ В КРАПЛИННО-ПЛІВКОВОМУ СТАНІ

В.О. Берека^{1*}, І.В. Божко^{1**}, канд.техн.наук, В.О. Бржезицький^{2***}, докт. техн. наук,
Я.О. Гаран^{2****}, канд.техн.наук, Є.А. Троценко^{2*****}, канд.техн.наук.

¹Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна,

e-mail: ws77@ukr.net,

²НТУ України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»,

пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна.

Шляхом моделювання проведено дослідження розподілу напруженості електричного поля та потенціалу в повітряному пласко-паралельному проміжку електродної системи задля створення імпульсного бар'єрного розряду при наявності в ній води в краплинно-плівковому стані. Розрахунки виконані за умов уніполярних імпульсів напруги з тривалістю фронту ≈ 40 нс, ширині газового проміжку 3,2 мм, товщині плівок води на його стінках 0,15 мм, діаметру крапель 0,5–1,5 мм. Показано, що за присутності крапель води значно змінюється розподіл електричного поля в проміжку: з однорідного він стає різко неоднорідним. Найвища напруженість поля спостерігається в точках на поверхні краплі, що найближчі до стінок проміжку. Ця напруженість в $\approx 2,5$ рази вища за ту, що відповідає однорідному полю. Також розглянуто вплив сусідніх крапель на розподіл напруженості електричного поля. Він є суттєвим ($>10\%$) тільки тоді, коли відстань між сусідніми краплями стає меншою 1,5 мм. Бібл. 8, рис.6.

Ключові слова: імпульсний бар'єрний розряд, напруженість електричного поля, краплі, плівка води, повітря.

Забруднення води через антропогенний вплив на навколишнє середовище і здоров'я людей та обмежені запаси питної води відносяться до сьогоденних актуальних проблем. Одним із основних джерел забруднень водних систем є стоки традиційних очисних споруд, в яких обробка води проходить через три основні стадії [1]. Первинна стадія складається із ряду етапів механічної та фізико-хімічної обробки, на яких з води видаляють тверді частинки, включаючи пісок, а також масло, жири тощо. Вторинна зазвичай полягає в біологічному перетворенні розчинених і колоїдних органічних речовин в стабілізовані низькоенергетичні сполуки за допомогою різноманітних груп мікроорганізмів за присутності кисню. Третя стадія – це додаткова обробка, необхідна для того, щоб зробити хімічний та біологічний склад води можливим для скидання в приймальне середовище. Серед методів, що використовуються на цьому етапі, поширеними є традиційне хлорування та озонування води, використання ультрафіолетового світла та інші, до яких відносяться нові технології АОР (Advanced Oxidation Processes) [1–3], за яких генерація окиснювачів відбувається безпосередньо в зоні, у якій потрібне розкладання забруднювачів води.

Імпульсний бар'єрний розряд (ІБР) на поверхню води, що генерує низькотемпературну плазму, є видом АОР, за яких утворюються високоактивні частинки з окисними потенціалами, більшими ніж у кисню O_2 (1,2 В): пероксид водню H_2O_2 (1,8 В), озон O_3 (2,1 В), гідроксильний радикал OH^* (2,7 В) тощо. Оскільки ці речовини взаємодіють з водою в основному на межі «газ-рідина», обробку води необхідно виконувати при великому співвідношенні площини поверхні води до її об'єму (~ 10 м²/л). Цього можна досягти за умов, коли вода знаходиться в плівковому (товщина плівки $\approx 0,1$ – $0,15$ мм) [4, 5] чи крапельному стані (діаметр крапель ~ 1 мм) [6]. Але основною проблемою практичного використання технології обробки води ІБР є високі питомі енерговитрати, які залежать не тільки від виду та концентрації забруднювачів [1], а й від напруженості електричного поля E та його розподілу в газовому проміжку, бо саме вони визначають енергію електронів і проходження корисних плазмохімічних реакцій [5], а також дезінфекцію води [7]. В деякій мірі відповідь на це питання було дано в роботі [8], основний висновок якої полягає в тому, що у разі ІБР біля поверхні краплі води величина E значно зростає. Однак в ній у розрахунках був використаний спрощений підхід, а також не досліджений вплив параметрів руху води (діаметр крапель, плівки на

© Берека В.О., Божко І.В., Бржезицький В.О., Гаран Я.О., Троценко Є.А., 2020
ORCID ID: *<https://orcid.org/0000-0003-0888-2864>, **<http://orcid.org/0000-0002-7955-246X>,
<http://orcid.org/0000-0002-9768-7544>, *<http://orcid.org/0000-0003-3242-9218>,
*****<http://orcid.org/0000-0001-9379-0061>

електродах, питомої електропровідності води тощо). Окрім цього обчислення проводились для електродної системи, яка обумовлювала небажану для обробки води ІБР первісно велику неоднорідність поля та малий час (~ 1 мс) знаходження крапель води в розрядному проміжку, де вона обробляється, що суттєво зменшує енергоефективність процесу.

Метою даної роботи є моделювання розподілу електричного поля в електродній системі для генерації ІБР за наявності в ній води в краплинно-плівковому стані, а також визначення впливу на цей розподіл питомої електропровідності води, розміру крапель та відстані між ними. Це надасть змогу отримати нові знання про характер і фізичні процеси, що проходять при ІБР, а також оптимізувати технологію обробки води таким розрядом.

Електродна система для обробки води та моделювання електричного поля в ній. Розрахунки проводились для електродної системи, яку в подальшому планується використовувати в установці обробки води ІБР. Конструкцію цієї системи наведено на рис. 1. Газовий проміжок 7 електродної системи утворюється паралельними металевою 1 та склотекстолітовою 4 пластинами, розташованими на відстані $\delta = 3.5$ мм, що мають висоту 100 мм та ширину 300 мм. Така величина δ є характерною при обробці води в плівковому [4, 5] чи крапельному [6] стані, бо при $\delta < 2,5$ мм існує можливість перемикання газового проміжку 7 водяними містками, а при $\delta > 4$ мм для створення ІБР з інтенсивною іонізацією газу в ньому потрібні занадто високі напруги (понад 30 кВ), що з точки зору енергозбереження та ускладнення високовольтного джерела живлення є небажаним. Пластина 4, що виконує роль діелектричного бар'єру, має товщину 2 мм, відносну діелектричну проникність 4,5 і питому електропровідність $1 \cdot 10^{-13}$ См/см. З її зовнішньої сторони щільно приклеєний металевий електрод 5, на який подаються імпульси високої напруги (ВН). Вода в повітряний проміжок вводиться через керамічні трубки 2, що мають внутрішній діаметр 0,6 мм. Відстань між осями цих трубок становить 3,5 мм. Дослідження показали, що вода при її тиску на вході у трубки 200 Па витікає з них суцільними цівками діаметром 0,6 мм та довжиною ≈ 30 мм, які потім перетворюються на краплі з характерним діаметром 1 мм. Вони летять вниз зі швидкістю ≈ 2 м/с при відстані між ними $\approx 2,5$ мм. Під час руху частина крапель попадає на стінки газового проміжку, які є гідрофобні. Щоб запобігти утворенню на них великих крапель та виникненню водяних містків, які можуть перемикати проміжок, внутрішні поверхні електрода та бар'єра вкриті тонким ($\approx 0,1$ мм) шаром бавовняної тканини. Завдяки цьому по стінкам газового проміжку вода стікає плівками 3, які в нижній частині електродної системи мають товщину $\sim 0,15$ мм. Параметри руху крапель визначалися на основі аналізу фотознімків.

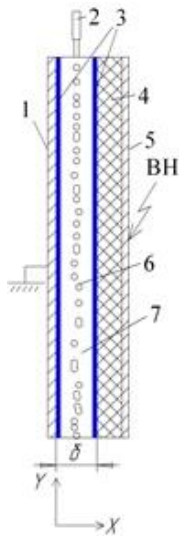


Рис. 1

Висока напруга підводиться від високовольтного джерела живлення, що забезпечує уніполярні імпульси, фронт та тривалість яких становить біля 40 та 80 нс відповідно. До складу джерела входить магнітний ключ, який відразу після проходження імпульсу прямого струму за час ≈ 40 нс розряджає ємність діелектричного бар'єра. Внаслідок цього напруга на електродній системі зменшується до нуля і упродовж всього часу між імпульсами (~ 10 мс) відсутня. Тому при розрахунках кожен імпульс напруги розглядався як одиничний.

Моделювання електричного поля при поданні імпульсу напруги на електродну систему (ЕС) (рис. 1) проводилося з використанням програми FEMM методом кінцевих елементів на основі рішення рівняння

$$-(\sigma + j\omega\varepsilon)\nabla^2\varphi = 0,$$

де σ , ε – відповідно питома електропровідність та діелектрична проникність середовища; $\omega = 2\pi f$ – кругова частота; φ – електричний потенціал. Розрахунки виконувались в двовимірній постанові в припущенні нескінченно великих (по висоті та ширині) електродів з заміною реального імпульсу напруги $u(t)$ (t – час) близької до нього по формі половиною синусоїди $U_m \sin \omega t$ ($0 \leq t \leq 0,5/f$, U_m – амплітуда напруги, частота $f = 7,14$ МГц). При моделюванні досліджувались впливи на напруженість електричного поля в ЕС полярності імпульсу напруги, питомої електропровідності води σ , яка змінювалася в межах від $2 \cdot 10^{-6}$ См/см (дистильована вода) до $1 \cdot 10^{-2}$ См/см (морська вода), діаметра крапель $d_k = 0,5 - 1,5$ мм та відстані від поверхонь сусідніх крапель $s = 0,5 - 4$ мм. Через те, що за час дії імпульсу напруги краплі проходили вельми малий шлях ($\sim 0,1$ мкм) при моделюванні вони вважались нерухомими. Приймалось також, що всі краплі розташовані по центру газового проміжку і мають сферичну форму. Розрахунки проводилися за амплітудою імпульсу $U_m = 3$ кВ, при якій іонізація повітря відсутня, тому його питома електропровідність вважалась рівною нулю. Спочатку було

виконано моделювання в припущенні, що в проміжку знаходиться тільки одна крапля, а потім – з урахуванням впливу сусідніх крапель.

Результати досліджень та їхній аналіз. Розподіли напруженості електричного поля $E(x)$ (крива 1) та потенціалу $\varphi(x)$ (крива 2) між електродами при знаходженні в газовому проміжку однієї краплі водопровідної води ($\sigma=2 \cdot 10^{-4}$ См/см) діаметром 1 мм в момент, коли імпульс напруги досягає амплітудного значення, наведено на рис. 2 (вісь X проходить через центр краплі, відлік координати x від заземленого електрода. Верхня половина контуру краплі умовно представлена пунктиром 5). Як видно з рисунку, величини E в обох плівках води та краплі вельми малі ($<0,1$ кВ/см), і за масштабом рис. 2

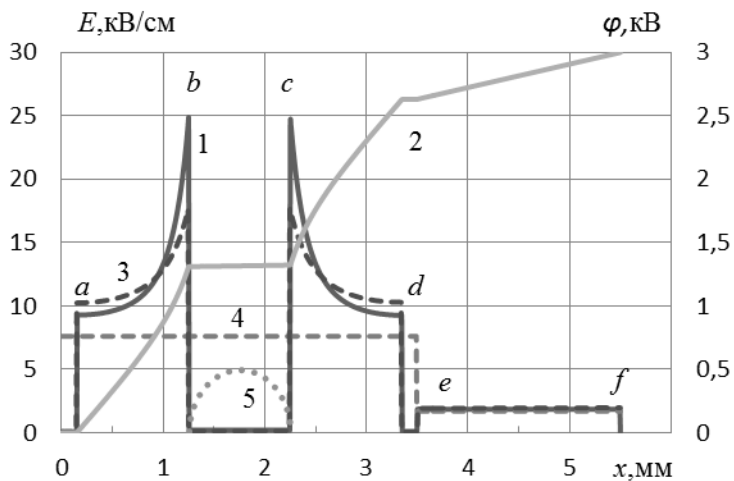


Рис. 2

вони нібито лежать на осі X , але на межах «плівка-повітря» та «повітря-крапля» (т. a, b, c, d) відбуваються стрибки напруженості поля відповідно на $\approx 2-3$ порядки (до 9 та 25 кВ/см). При цьому на поверхні краплі напруженість майже утворює вище, ніж на поверхні плівки води. По товщині діелектричного бар'єру (т. e, f) напруженість практично незмінна ($\approx 0,25$ кВ/см) і більш ніж на порядок менше тієї, що в газі. Залежність потенціалу $\varphi(x)$ свідчить, що в плівках води та краплі практично відсутнє падіння напруги. В основному воно припадає на повітряні проміжки ($\approx 90\%$) та в деякій мірі на бар'єр ($\approx 10\%$). Для порівняння на рис. 2 також наведено розподіли $E(x)$ для

випадків, коли в проміжку знаходиться суцільна цівка води діаметром 1 мм (пунктирна лінія 3) або взагалі нема води (пунктир 4). Перехід від крапель до цівки якісно не змінює розподіл електричного поля в проміжку, але зменшує його на поверхні цівки на $\approx 30\%$. Тому обробку води доцільно вести саме в крапельному стані. За відсутності в проміжку води поле в ньому однорідне і значно (до 3 разів) менше того, що існує на поверхні краплі. Моделювання також показало, що зміни питомої електропровідності води та полярності імпульсу практично ($<1\%$) не впливають на розподіли $E(x)$ та $\varphi(x)$. При цьому самі величини E, φ лінійно залежать від значень U_m (без урахування іонізації газу). На рис. 2 показано, що в місцях перетину краплі віссю X (т. b та c) напруженість електричного поля в газовому проміжку найбільша. Але, якщо рухатися по зовнішньому контуру вертикального перерізу краплі від т. b до т. c (зверху чи знизу), величина E на поверхні краплі змінюється. На рис. 3 наведено залежність $E(l)$, в якій l – криволінійна координата, що відраховується від т. b по зовнішній лінії перерізу краплі в площині $X - Y$ ($d_k=1$ мм). Як видно з рисунку, у координаті $l=0,78$ мм, якій відповідає точка перетину вертикальної осі симетрії краплі з контуром перерізу, величина напруженості поля наближується до мінімального значення, а потім знову зростає до максимуму. Моделювання показало, що майже впродовж всієї довжини l вектор напруженості електричного поля має фактично тільки нормальну до поверхні краплі складову. Лише на невеликій ділянці $l=0,76-0,80$ мм (зверху та знизу краплі та в найбільш віддалених від стінок проміжку областях на горизонтальній площі перерізу) існує тангенціальна складова на рівні $\sim 0,1$ кВ/см, яка перевищує нормальну.

Залежність максимального значення напруженості електричного поля на поверхні крапель E_m від їхнього діаметру наведено на рис. 4. Вона свідчить про те, що зі збільшенням d_k величини E_m в деякій мірі ($\sim 10\%$) зростають. Це можна пояснити тим, що збільшення d_k зменшує сумарну довжину газового проміжку, на яку припадає основна частина напруги U_m , внаслідок чого напруженість E_m , яка пропорційна U_m/d_k , зростає.

Наявність сусідніх крапель понижує величину E_m . Це видно з рис. 5, ($d_k=1$ мм) на якому крива 1 показує залежність E_m від відстані $s=0,5-4$ мм між найближчими точками на поверхнях (по вертикалі) сусідніх крапель. Пунктир 2 відповідає значенню E_m для випадку однієї краплі того ж діаметру 1 мм. Найбільш помітний вплив сусідніх крапель (до 10%) тоді, коли $s < 1,5$ мм. При $s > 3$ мм він складає лише $\approx 0,5\%$. Таким чином залежність $E_m(s)$ також дає підстави вважати, що краплі,

утворювані сусідніми соплами, які розташовані на відстані 3,5 мм одне від одного, мало можуть впливати на величину E_m .

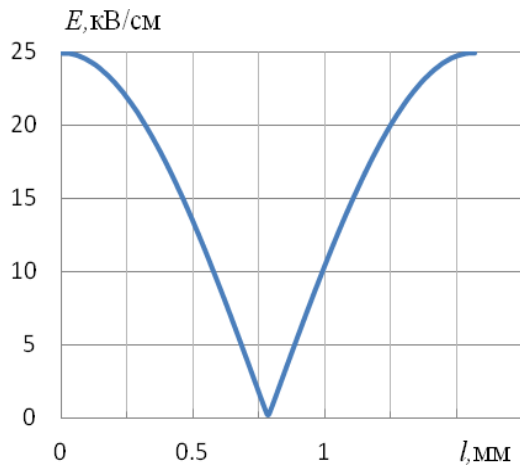


Рис. 3

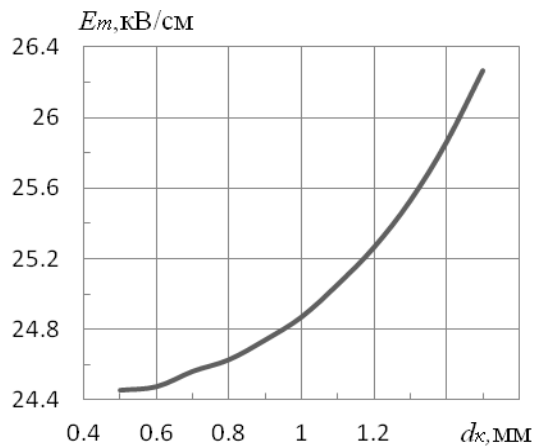


Рис. 4

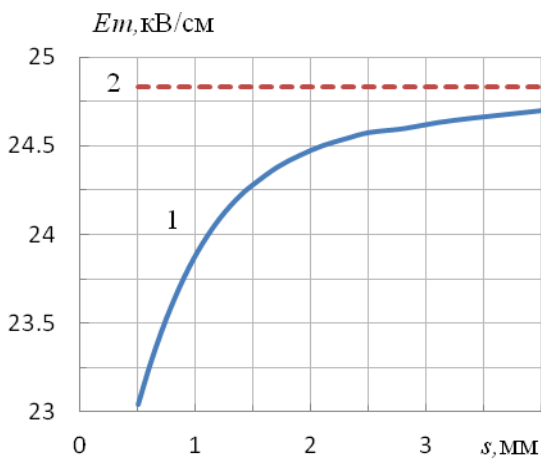


Рис. 5

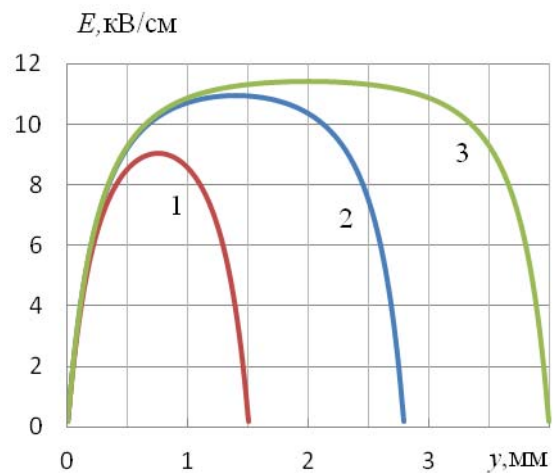


Рис. 6

Розподіли напруженості електричного поля $E(y)$ вздовж вертикальної осі Y (відлік координати y починається від найвищої точки на поверхні краплі) для випадків $s=2,0$; $2,8$ та $4,0$ мм наведено на рис. 6 відповідно кривими 1 – 3. Вони свідчать, що посередині між краплями поле досягає максимуму E_m . Значення напруженості E_m зростають зі збільшенням відстані між краплями. В той же час вони залишаються в $\approx 2,5$ рази меншими, ніж величин E_m (для однакових значень s). Протяжність зони, в якій напруженість поля $E \approx E_m$, тим більша, чим більша відстань між краплями.

Висновки. 1. Наявність води в краплинно-плівковому стані в пласкопаралельному газовому проміжку електродної системи, призначеному для створення уніполярного імпульсного бар'єрного розряду з фронтом близько 40 нс змінює розподіл напруженості електричного поля в ньому таким чином, що з однорідного він стає суттєво неоднорідним. При цьому найбільша напруженість, яка в $\approx 2,5$ рази вища ніж для однорідного поля (яке існує, коли нема води в проміжку), відповідає місцям на поверхні розділу «повітря-крапля», що розташовані найближче до стінок газового проміжку, утвореного електродом та бар'єром. Проте, якщо рухатися по поверхні краплі від цих місць до найвіддаленіших від стінок проміжку областей, вона монотонно спадає майже на 3 порядки. Вектор напруженості поля практично на всій поверхні краплі направлений до неї по нормалі.

2. При збільшенні діаметру крапель в межах $0,5$ – $1,5$ мм максимальна напруженість електричного поля на їхніх поверхнях монотонно зростає (до 10%). Вплив сусідніх крапель на напруженість поля стає суттєвим ($\approx 10\%$) тоді, коли відстань між їхніми поверхнями стає меншою $\approx 1,5$ мм. За відстанню між краплями понад $\approx 2,5$ мм, їхній взаємовплив стає малопомітним (0,5%).

3. Напруженість електричного поля на межах «плівка-повітря» також підвищена ($\approx 15\%$) у порівнянні з однорідним полем в газовому проміжку (коли вода відсутня), а в самих плівках та краплях води – на $\approx 2,5$ порядки менша, ніж в газі.

4. Полярність імпульсів напруги, що подаються на електродну систему, та питома електропровідність води в межах досліджених значень ($2 \cdot 10^{-6} - 1 \cdot 10^{-2}$ См/см) помітно ($< 1\%$) не впливають на результати моделювання. Їхня залежність від напруги імпульсу є лінійною (без урахування можливої іонізації повітря).

5. Не зважаючи на те, що проведене моделювання виконано при відносно малих напругах, коли нема іонізації повітря, вони вказують на те, що наявність в газовому проміжку крапель води супроводжується кількарразовим підсиленням напруженості електричного поля на їхніх поверхнях по відношенню до напруженості на поверхнях плівок, тому обробка води в крапельному стані є більш перспективним методом, ніж в плівковому. Визначення можливого впливу іонізації повітря на розподіл електричного поля в імпульсному бар'єрному розряді повинно бути предметом подальших досліджень.

Робота виконана за держбюджетною темою «Розвиток теорії електрофізичних процесів в імпульсних системах електромагнітної обробки електропровідних середовищ («БАР'ЄР-2»), яка виконується згідно з Постановою Бюро ВФТПЕ Президії НАН України від 04.07.2018р. (протокол №11). Державний реєстраційний номер теми 0117U007714.

1. Vanraes P., Nikiforov A.Y., Leys Ch. Electrical Discharge in Water Treatment Technology for Micropollutant Decomposition. Chapter 15. InTech, 2016. Pp. 457-506. DOI: <http://dx.doi.org/10.5772/61830>

2. Bo Jiang, Jingtang Zheng, Shi Qiu, Qinhuai Zhang, Zifeng Yan, Qingzhong Xue. Review on Electrical Discharge Plasma Technology for Wastewater. *Chemical Engineering Journal*. 2014. No 236. Pp. 348-363.

3. Shen Zhao, Chunjing Hao, Di Xu, Yiyong Wen, Jian Qiu, Kefu Liu. Effect of Electrical Parameters on Energy Field of Organic Pollutant Degradation in a Dielectric Barrier Discharge Reactor. *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2017. Vol. 45. Issue 6. Pp. 1043-1050.

4. Dojchinovich B.P., Roglich G.M., Obradovich B.M., Kuraica M.M., Kostich M.M., Nesich J., Manojlovich D.D. Decolorization of Reactive Textile Dyes Using Water Falling Film Dielectric Barrier Discharge. *Journal of Hazardous Materials*. 2011. No 192. Pp. 763-771. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.05.086>

5. 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. 80-86. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2017.06.080>

6. Яворовский Н.А., Корнев Я.И., Прейс С.В., Пельцман С.С., Хаскельберг М.Б., Чен Б.Н. Активные частицы-окислители в водо-воздушном потоке. *Известия Томского политехнического института*. 2006. Т. 309. № 2. С.108-113.

7. Schoenbach K.H., Joshi R.P., Stark R.H., Dobbs F.C., Beebe S.J. Bacterial Decontamination of Liquids with Pulsed Electric Fields *IEEE Transactionson Dielectrics and Electrical Insulation*. 2000. Vol. 7. No 5. Pp. 637-645.

8. Kornev Ya.I., Isaev Yu.N., Ushakov V.Ya., Khaskelberg M.B., Yavorovskii N.A., Kolchanova V.A. Influence of the Distribution of Electric Fields in a Reactor of Electrodischarge Water Treatment on the Treatment Efficiency. *Russian Physics Journal*. 2004. Vol. 47. No 10. Pp. 1062-1070.

УДК 537.523.9

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ЭЛЕКТРОДНОЙ СИСТЕМЕ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ИМПУЛЬСНОГО БАРЬЕРНОГО РАЗРЯДА В АТМОСФЕРНОМ ВОЗДУХЕ В ПРИСУТСТВИИ ВОДЫ В КАПЕЛЬНО-ПЛЕНОЧНОМ СОСТОЯНИИ

В.О. Берека¹, И.В. Божко¹, канд.техн.наук, **В.А. Бржезицкий²**, докт.техн.наук, **Я.А. Гаран²**, канд.техн.наук, **Е.А. Троценко²**, канд.техн.наук.

¹Институт электродинамики НАН Украины,

пр. Перемоги, 56, Киев, 03057, Украина,

e-mail: ws77@ukr.net.

²НТУ Украины «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского»,

пр. Победы, 37, Киев, 03056, Украина.

Путем моделирования проведено исследование распределения напряженности электрического поля и потенциала в электродной системе для создания импульсного барьерного разряда в атмосферном воздухе при наличии в нем воды в капельно-пленочном состоянии. Расчеты выполнены при условиях, что длительность фронта импульса ≈ 40 нс, ширина газового промежутка 3,2 мм, толщина пленок воды на его стенках 0,15 мм и диаметре капель 0,5 – 1,5 мм. Показано, что присутствие капель воды кардинально меняет распределение

поля в промежутке: с однородного оно стает резконеоднородным. Максимальная напряженность поля наблюдается в точках на поверхности капли, которые расположены ближе всего к стенкам промежутка. Эта напряженность в $\approx 2,5$ раза выше той, которая характерна для однородного поля при отсутствии капель. Также рассмотрено влияние соседних капель на распределение электрического поля. Оно становится существенным ($> 10\%$), когда расстояние между соседними каплями уменьшается до величин менее $\approx 1,5$ мм. Библ.8, рис.6.

Ключевые слова: импульсный барьерный разряд, напряженность электрического поля, капля, пленка воды, воздух.

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 A DROPLET-FILM STATE

V.O. Bereka¹, I.V. Bozhko¹, V.A. Brzhezitsky², Ya. Haran², Ye. A. Trotzenko²

¹Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine,

pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine, e-mail: ws77@ukr.net,

²National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»,

pr. Peremohy, 37, Kyiv, 03056, Ukraine.

By simulation, it was stated the distribution of the electric field strength and potential in electrode sstem for creation a pulsed barrier discharge in atmospheric air in the presence of water in it in a droplet-film state. The calculations were performed under the conditions that the duration of the pulse front is ≈ 40 ns, the width of the gas gap is 3.2 mm, the thickness of the water films on its walls is 0.15 mm and the diameter of the droplets is 0.5 - 1.5 mm. It is shown that the presence of water droplets dramatically changes the distribution of the field in the gap: from uniform it becomes sharply inhomogeneous. The maximum field strength is observed at points on the surface of the drop, which are located nearest to the walls of the gap. This field strength is ≈ 2.5 times higher than that characteristic of a uniform field in the absence of a drop. The effect of neighboring drops on the distribution of the electric field is also considered. It becomes significant ($> 10\%$) when the distance between adjacent drops becomes less than ≈ 1.5 mm. Referenses 8, figures 6.

Keywords: pulsed barrier discharge, electric field strength, drop, water film, air.

1. Vanraes P., Nikiforov A.Y., Leys Ch. Electrical Discharge in Water Treatment Technology for Micropollutant Decomposition. Chapter 15. InTech, 2016. Pp. 457-506. DOI: <http://dx.doi.org/10.5772/61830>
2. Bo Jiang, Jingtang Zheng, Shi Qiu, Qinhui Zhang, Zifeng Yan, Qingzhong Xue. Review on electrical discharge plasma technology for wastewater. *Chemical Engineering Journal*. 2014. No 236. Pp. 348-363.
3. Shen Zhao, Chunjing Hao, Di Xu, Yiyong Wen, Jian Qiu, Kefu Liu. Effect of Electrical Parameters on Energy Field of Organic Pollutant Degradation in a Dielectric Barrier Discharge Reactor. *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2017. Vol. 45. Issue 6. Pp. 1043-1050.
4. Dojchinovich B.P., Roglich G.M., Obradovich B.M., Kuraica M.M., Kostich M.M., Nesich J., Manojlovich D.D. Decolorization of Reactive Textile Dyes Using Water Falling Film Dielectric Barrier Discharge. *Journal of Hazardous Materials*. 2011. No 192. Pp. 763-771. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.05.086>
5. Bozhko I.V., Karlov O.M., Kondratenko I.P., Cherny D.V. Development of a Complex for the Treatment of Water by Impulse Barrier. *Tekhnichna Electrodynamika*. 2017. No 6. Pp. 80-86. DOI: <https://doi.org/10.15407/techmed2017.06.080> (Ukr)
6. Yavorovsky N.A., Kornev Ya.I., Preiss S.V., Peltzman S.S., Haskelberg M.B., Chen B.N. Active oxidizing particles in the water-air stream. *News of the Tomsk Polytechnic Institute*. 2006. Vol. 309. No 2. P.108-113. (Rus)
7. Schoenbach K.H., Joshi R.P., Stark R.H., Dobbs F.C., Beebe S.J. Bacterial Decontamination of Liquids with Pulsed Electric Fields. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2000. Vol. 7. No 5. Pp. 637-645.
8. Kornev Ya.I., Isaev Yu.N., Ushakov V.Ya., Khaskelberg M.B., Yavorovskii N.A., Kolchanova V.A. Influence of the Distribution of Electric Fields in a Reactor of Electrodisharge Water Treatment on the Treatment Efficiency. *Russian Physics Journal*. 2004. Vol. 47. No 10. Pp. 1062-1070.

Надійшла 02.01.2020
Остаточний варіант 28.01.2020