

ОДНОРІДНІСТЬ ІМПУЛЬСНОГО БАР'ЄРНОГО РОЗРЯДУ В АТМОСФЕРНОМУ ПОВІТРІ ЗА ПРИСУТНОСТІ ВОДИ В КРАПЛИННО-ПЛІВКОВОМУ СТАНІ

І.В. Божко*, канд.техн.наук, В.О. Берека**

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

e-mail: ws77@ukr.net

Досліджено утворення однорідного бар'єрного розряду в повітряному проміжку атмосферного тиску між плоско-паралельними електродами за наявності води в краплинно-плівковому стані внаслідок дії уніполярних імпульсів напруги тривалістю менше 100 нс із фронтами близько 40 нс та амплітудою до 28 кВ. Дослідження виконувалися за товщини діелектричного бар'єра 2 мм на одному з електродів та довжини газового проміжку 3 мм. Характерні розміри крапель водопровідної води становили 1 мм, а її плівки на стінках газового проміжку порядку 0,1 мм. Показано, що із зростанням частоти повторення імпульсів напруги понад 300 Гц розряд стає неоднорідним: у газовому проміжку виникають зони з більш яскравими ниткоподібними утвореннями. У разі поперечної продувки газового проміжку повітрям, швидкість якого на вході в електродну систему складає близько 0,6 м/с, гранична частота переходу розряду в неоднорідний підвищується до 500 Гц і вище. Однорідний розряд мав такі характерні амплітудні значення: напруженість електричного поля в газовому проміжку близько 60 кВ/см, густина струму – 2,6 А/см², концентрація електронів – $8,5 \cdot 10^{11}$ см⁻³ та їхня середня енергія – 3,7 еВ. Бібл. 12, рис. 7.

Ключові слова: однорідний та неоднорідний імпульсний бар'єрний розряд, повітря атмосферного тиску, краплі та плівка води.

Бар'єрний розряд (БР) забезпечує відносно просту технологію створення нерівноважної плазми у газах атмосферного тиску. Це сприяло поширенню застосування БР на практиці у разі генерації озону, очищення води та газів, обробки поверхні твердих матеріалів тощо [1]. За способом створення ці розряди поділяються на дві основні групи: традиційний БР, що збуджується змінною (синусоїдальною) напругою з частотою до десятків кГц [1–3] та імпульсний бар'єрний розряд (ІБР), який генерується імпульсами напруги малої тривалості (~100 нс) [4–6]. БР першої групи характеризуються відносно малими густинами струмів, що не перевищують десятків мА/см², та середньою енергією електронів у розряді $T_e \sim 1\text{--}3$ еВ [1, 2]. У випадку ІБР завдяки можливості створення в газі електричного поля високої напруженості, яка зазвичай у кілька разів перевищує значення, необхідне для ініціювання БР змінного струму, густина струму на 1–2 порядки більша [4], а величина T_e може перевищувати 5 еВ [5]. Окрім цього внаслідок тривалої паузи між імпульсами струму зменшуються непродуктивні витрати енергії. Ці переваги ІБР у разі практичного використання забезпечують йому значний вигравш за енергоефективністю та продуктивністю у порівнянні з традиційним БР. Експериментально доведено [4–6], що в атмосферному повітрі за частот повторення імпульсів напруги до 1 кГц на газових проміжках до 4 мм можна створити просторово-однорідний імпульсний бар'єрний розряд (ОІБР).

Однією зі сфер застосування ІБР у повітрі атмосферного тиску є обробка води, коли він діє на воду в плівковому [7, 8] чи краплинному стані [7, 9]. Можна припустити, що така обробка ефективніша тоді, коли ІБР однорідний. Зокрема, на це вказують результати [10], які показали, що у разі ОІБР енергоефективність генерації озону вдвічі вища ніж при неоднорідному. Але з публікацій [7–9] не зрозуміло, який просторовий вигляд мав ІБР у цих дослідженнях. Тому **метою роботи** є підтвердження на практиці принципової можливості формування ОІБР у повітрі атмосферного тиску за наявності в газовому проміжку води у краплинно-плівковому стані, дослідження достатніх умов для його утворення, визначення діапазону частот повторення імпульсів напруги і вплив на нього швидкості поперечної продувки газового проміжку повітрям.

Експериментальна установка. Дослідження проводилися з електродною системою, побудова якої схематично показана на рис. 1. ІБР проходив у повітряному проміжку 8, через який рухалася вода. Проміжок утворювався паралельно розташованими алюмінієвою 1 та склотекстолітовою 5 пластинами. Остання мала товщину 2 мм і виконувала роль діелектричного бар'єра. З зовнішнього боку цієї пластини був щільно приклеєний електрод 6, розміри якого показані на рис. 1. На цей електрод подавалася висока напруга (ВН). Площа електрода S становила 18 см², відносна діелектрична проник-

ність та ємність бар'єра 5 – відповідно 4,2 та 50 пФ. Відстань δ між пластинами 1 та 5 задавалася чотирма уставками 4, які були розташовані по кутах електродної системи і мали товщину 3,5 мм. Така величина δ була вибрана з тих міркувань, що обробка води в плівковому стані ІБР, як правило, ведеться за величин газового проміжку 3–4 мм.

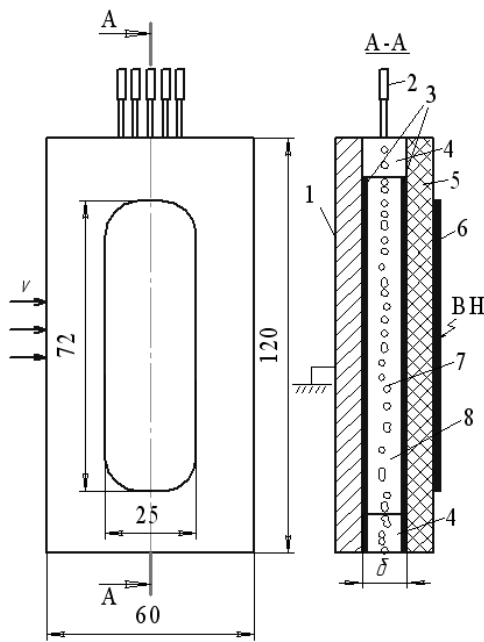


Рис. 1

Вода у повітряний проміжок вводилася через п'ять керамічних трубок 2, які мали довжину 6 мм і внутрішній діаметр 0,6 мм. Відстань між осями трубок становила 3,5 мм, а від їхніх нижніх кінців до верхнього зрізу електродної системи – 15 мм. Тиск води на вході у трубки складав ≈ 200 Па. За цих умов вода витікала з трубок суцільними цівками діаметром $\approx 0,6$ мм та довжиною ≈ 20 мм, котрі в подальшому перетворювалися в краплі води 7 з характерними діаметрами 1 мм, які рухалися вниз зі швидкістю ~ 1 м/с. Загальні витрати води (на всі трубки) складали 150 мл/хв. Під час руху частина крапель потрапляла на стінки газового проміжку, які є гідрофобними. Щоб запобігти утворенню на них великих крапель та перемиканню проміжку ними, внутрішні поверхні електрода 1 та бар'єра 5 вкриті тонким ($\sim 0,15$ мм) шаром бавовняної тканини, завдяки чому вздовж їхньої поверхні вода стікає просторово однорідною плівкою 3 товщиною порядку 0,1 мм. В електродній системі також передбачалася можливість дослідження впливу на характер ІБР поперечної продукції повітрям газового проміжку зі швидкістю v (рис. 1).

Параметри руху крапель води знаходилися на основі аналізу фотознімків, виконаних камерою Cannon A630. Таким саме чином визначалася однорідність ІБР. Фотозйомка розряду проводилася за максимальної чутливості камери ISO 800 та такому допустимо малому часі експозиції τ , щоб отримати якісні знімки, які можна було б однозначно інтерпретувати. Як правило, це можна було зробити в темній кімнаті, коли за час τ інтегрувалося випромінювання кількох (1–4) десятків ІБР. При збільшенні цього числа до сотень через велику інтегральну інтенсивність світіння не завжди можна було однозначно ідентифікувати форму розряду. Два крайні види розряду (однорідний та неоднорідний) легко розпізнавалися неозброєним оком. Але існували такі режими ІБР, коли візуально було важко зробити однозначні висновки стосовно характеру розряду. В таких випадках фотографії давали більш переконливу відповідь.

У роботі використовувалося джерело живлення, яке забезпечувало уніполярні імпульси напруги з амплітудою до 30 кВ тривалістю порядку 100 нс та фронтом ≈ 40 нс. До складу джерела входив магнітний ключ, який сприяв розряджанню ємності діелектричного бар'єра після проходження прямого імпульсу струму через електродну систему. Більш детально джерело живлення розглянуто у [7]. Осцилограми напруги і струму записувалися осцилографом TDS 1012, до якого були підключені датчики напруги P1015 та струму P6021.

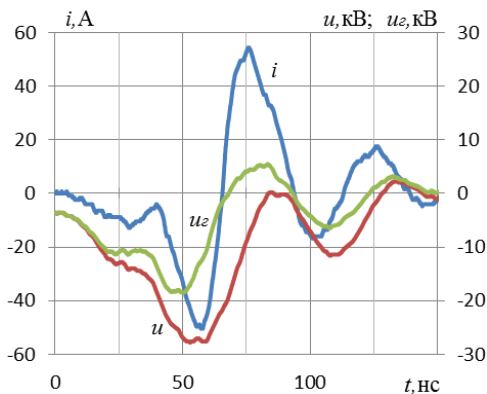


Рис. 2

Результати досліджень та їхній аналіз. Типові осцилограми напруги $u(t)$ та струму $i(t)$ ІБР через електродну систему показано на рис. 2 (частота повторення імпульсів $f=100$ Гц). Як видно з рисунка, імпульс напруги, який має тривалість фронту ≈ 40 нс, досягає максимального значення $U_m=27,6$ кВ, а імпульс струму складається із двох основних ділянок: прямого струму ($t=0-65$ нс) з амплітудою $I_{m1}=47$ А і зворотного ($t=65-90$ нс) з амплітудою $I_{m2}=52$ А, який обумовлений розрядженням ємності діелектричного бар'єра через магнітний ключ. На рис. 2 також показана зміна у часі напруги на газовому проміжку $u_z(t)$, що дорівнює різниці між напругами на електродній системі $u(t)$

та діелектричному бар'єрі $u_0(t)$, яка, в свою чергу, обчислювалася за методикою [11]. За цією самою методикою була підрахована енергія $W_s=17$ мДж, що виділяється за час одного ІБР у газовому проміжку. За амплітудного значення $u_z(t)=U_{zm}=17,8$ кВ ($t=47$ нс) напруженість електричного поля в газовому проміжку становить $E_{zm}=U_{zm}/\delta_l=59,3$ кВ/см, де $\delta_l=3$ мм – фактична довжина газового проміжку з урахуванням

товщин тканини та водяної плівки на електроді та на бар'єрі. Для поля такої напруженості, яка удвічі більша за ту, що необхідна для початку інтенсивної іонізації повітря, середня енергія електронів $T_e = 3,7$ еВ, що перевищує порогове значення енергії, коли починаються плазмохімічні реакції, внаслідок чого утворюються окиснювачі [12], котрі мають важливе значення для обробки води ІБР. Усереднена за площею амплітудна густина струму в момент, коли $i(t) = I_m$, складає $j_m = I_m/S = 2,6$ А/см². При цьому середня концентрація електронів у газі становить $N_e = 8,5 \cdot 10^{11}$ см⁻³, яка є характерною для стримерів у разі БР в атмосферному повітрі. (Величини T_e та N_e розраховувалися за методикою [11].)

Коли вода не надходить у повітряний проміжок, але його стінки вологі, параметри ІБР змінюються в незначній мірі: струм I_m зростає на $\approx 5\%$, а напруга U_m практично залишається тією самою. У випадку сухого проміжку ІБР стає нестабільним, що, найбільш ймовірно, пов'язано з присутністю на діелектричному бар'єрі залишкового електричного заряду, який не встигає зменшитися до несуттєвої величини під час паузи між імпульсами струму.

Форма розряду залежить від частоти f та наявності краплинно-плівкового руху води в газовому проміжку. Зі зростанням f розряд стає неоднорідним. Максимальна для даних умов частота, при якій ІБР є однорідним, $f_m \approx 300$ Гц. Це підтверджує знімок, зображений на рис. 3 і зроблений за $f = 294$ Гц. У разі подальшого збільшення частоти в газовому проміжку починають виникати виразні ниткоподібні утворення, рис. 4 ($f = 500$ Гц). Особливо це помітно в середній частині проміжку. Але, якщо застосувати поперечну продувку повітрям зі швидкістю $v \sim 0,6$ м/с на вході в електродну систему, ІБР

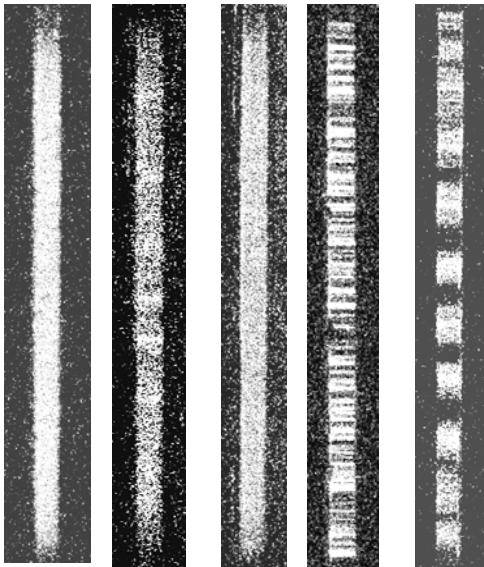


Рис. 3 Рис. 4 Рис. 5 Рис. 6 Рис. 7

знову навіть за $f = 500$ Гц стає однорідним, рис. 5. Вплив продувки розрядного проміжку, котра сприяє його охолодженню, вказує, що одним із ймовірних факторів, який спричиняє при підвищенні частоти перехід ІБР з однорідного в неоднорідний, є локальний нагрів газу в розрядному проміжку. Оціночні розрахунки показують, що за $f = 500$ Гц середня об'ємна густина енергії, яка виділяється в ньому, сягає значної величини (~ 1 Дж/см³), коли можливий суттєвий локальний нагрів газу (на десятки і навіть сотні градусів).

За відсутності руху води в повітряному проміжку розряд має явно виражену неоднорідну форму, рис. 6 ($f = 300$ Гц), яка притаманна ІБР навіть за малих частот (~ 10 Гц), що видно неозброєним оком. При зростанні f понад 300 Гц утворюються локальні зони, в яких існує світіння, рис. 7 ($f = 500$ Гц). Ці зони за частоти понад ~ 400 Гц починають під час ІБР безперервно рухатися вгору зі швидкістю $\sim 0,2$ м/с. Можна припустити, що неоднорідність ІБР, коли немає руху води, пов'язана з відсутністю охолодження нею газового проміжку. В цілому, фізика утворення однорідного ІБР повинна бути предметом подальших досліджень.

Знову навіть за $f = 500$ Гц стає однорідним, рис. 5. Вплив продувки розрядного проміжку, котра сприяє його охолодженню, вказує, що одним із ймовірних факторів, який спричиняє при підвищенні частоти перехід ІБР з однорідного в неоднорідний, є локальний нагрів газу в розрядному проміжку. Оціночні розрахунки показують, що за $f = 500$ Гц середня об'ємна густина енергії, яка виділяється в ньому, сягає значної величини (~ 1 Дж/см³), коли можливий суттєвий локальний нагрів газу (на десятки і навіть сотні градусів).

Висновки. 1. Імпульсний бар'єрний розряд у повітрі атмосферного тиску за наявності в газовому проміжку довжиною близько 3 мм води в краплинно-плівковому стані і тривалості фронту імпульсу напруги ≈ 40 нс та амплітуді напруженості електричного поля в газовому проміжку ≈ 60 кВ/см і частотах повторення імпульсів до 300 Гц є просторово однорідним. Цей розряд характеризується усередненими за площею газового проміжку параметрами: амплітудна густина струму – 2,6 А/см², концентрація і середня енергія електронів відповідно – $8,5 \cdot 10^{11}$ см⁻³ та 3,7 еВ.

2. У разі зростання частоти повторення імпульсів понад 300 Гц розряд стає неоднорідним: у ньому з'являються ниткоподібні утворення.

3. Граничну частоту переходу розряду в неоднорідний можна значно підвищити за рахунок поперечної продувки газового проміжку повітрям. Так, за швидкості повітря на вході в електродну систему $\approx 0,6$ м/с гранична частота перевищує 500 Гц. У разі відсутності плівки води на стінках газового проміжку розряд навіть за малої частоти (~ 10 Гц) є неоднорідним. Висувається припущення, що перехід розряду в неоднорідний обумовлено тепловими неоднорідностями, які виникають у газовому проміжку внаслідок суттєвого значення густини енергії (~ 1 Дж/см³), яка виділяється в ньому.

1. Ulrich Kogelschatz. Dielectric-barrier Discharges: Their History, Discharge Physics, and Industrial Applications. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*. 2003. Vol. 23. Issue 1. Pp. 1–46.

2. Samoilovich V.G., Gibalov V.I., Kozlov K.V. Physical chemistry of the barrier discharge. Moskva: Moskovskii Gosudarstvennyi Universitet, 1989. 175 p. (Rus)
3. Golubovskii Yu.B., Maiorov V.A., Behnke J.F., Tepper J., Lindmayer M. Study of the homogeneous glow-like discharge in nitrogen at atmospheric pressure. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2004. Vol. 37. Pp. 1346–1356.
4. Walsh J.L., Konga M.G. 10 ns pulsed atmospheric air plasma for uniform treatment of polymeric surfaces. *Applied Physics Letters*. 2007. Vol. 91. Pp. 251504 (3 pp).
5. Shao Tao, Long Kaihua, Zhang Cheng, Yan Ping, Zhang Shichang, Pan Ruzheng. Experimental study on repetitive unipolar nanosecond-pulse dielectric barrier discharge in air at atmospheric pressure. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2008. Vol. 41. P. 215203 (8 pp).
6. Shuai Zhang, Li Jia, Wen-chun Wang, De-zheng Yang, Kai Tang, Zhi-jie Liu. The influencing factors of nanosecond pulse homogeneous dielectric barrier discharge in air. *Spectrochimica Acta. Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 2014. Vol. 117. Pp. 535–540.
7. Bozhko I.V., Karlov A.N., Kondratenko I.P., Charnyj D.V. Development of complex for water treatment with pulse barrier discharge. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2017. No 6. Pp. 80–86. (Ukr).
DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2017.06.080>
8. 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.
9. Shen Zhao, Chunjing Hao, Di Xu, Yiyong Wen, Jian Qiu, Kefu Liu. Effect of Electrical Parameters on Energy Yield of Organic Pollutant Degradation in a Dielectric Barrier Discharge Reactor. *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2017. Vol. 45. Issue 6. Pp. 1043 – 1050.
10. Gnapowski E., Gnapowski S., Pytka Ja. Effect of Mesh Geometry on Power, Efficiency, and Homogeneity of Barrier Discharges in the Presence of Glass Dielectric. *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2018. Vol. 46. Issue 10. Pp. 3493 – 3498.
11. Bozhko I.V., Serdyuk Y.V. Determination of Energy of a Pulsed Dielectric Barrier Discharge and Method for Increasing Its Efficiency. *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2017. Vol. 45. Issue 12. Pp. 3064 – 3069.
12. Yukinori Sakiyama, David B. Graves, Hung-Wen Chang, Tetsuji Shimizu, Gregor E., Morfill J. Plasma chemistry model of surface microdischarge in humid air and dynamics of reactive neutral species. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2012. Vol. 45. P. 425201 (19 pp).

ОДНОРОДНОСТЬ ИМПУЛЬСНОГО БАРЬЕРНОГО РАЗРЯДА В ВОЗДУХЕ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ В ПРИСУТСТВИИ ВОДЫ В КАПЕЛЬНО-ПЛЕНОЧНОМ СОСТОЯНИИ

И.В. Божко, канд.техн.наук, **В.О. Берека**

Институт электродинамики НАН Украины, пр. Перемоги, 56, Киев, 03057, Украина, e-mail: ws77@ukr.net

Показана возможность создания в воздухе атмосферного давления в плоскопараллельном промежутке при наличии в нем воды в капельно-пленочном состоянии однородного импульсного барьерного разряда, который инициировался униполярными импульсами напряжения с амплитудой до 28 кВ и имевших фронты ≈ 40 нс. Исследования проводились при толщинах: диэлектрического барьера на одном из электродов – 2 мм, газового промежутка – 3 мм. Характерные размеры капель водопроводной воды составляли 1 мм, а ее пленки на стенках газового промежутка $\sim 0,1$ мм. Для этих условий были достигнуты такие амплитудные параметры разряда: напряженность электрического поля в газовом промежутке около 60 кВ/см, плотность тока – 2,6 А/см², концентрация электронов – $8,5 \cdot 10^{11}$ см⁻³ при их средней энергии – 3,7 эВ. При увеличении частоты повторения импульсов напряжения более ≈ 300 Гц разряд становится неоднородным: в газовом промежутке появляются зоны с яркими нитеобразными образованиями. Граничная частота перехода разряда в неоднородную форму становится существенно выше (более 500 Гц) при поперечной продувке газового промежутка воздухом, скорость которого на входе в электродную систему составляет $\approx 0,6$ м/с. Библ. 12, рис. 7.

Ключевые слова: однородный и неоднородный импульсный барьерный разряд, воздух, атмосферное давление, капли и пленка воды.

UNIFORM OF PULSE BARRIER DISCHARGE IN THE AIR OF ATMOSPHERIC PRESSURE IN THE PRESENCE OF WATER IN A DROP-FILM CONDITION

I.V. Bozhko, V.O. Bereka

Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine, pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine, e-mail: ws77@ukr.net

It was shown the possibility of creating in atmospheric air in a plane-parallel gap in the presence of water with a drop-film state of a uniform pulsed barrier discharge, which was initiated by unipolar voltage pulses of amplitudes up to 28 kV and fronts ≈ 40 ns and duration about 100ns. Studies were carried out at thicknesses: the dielectric barrier is 2 mm and the gas gap 3 mm. The characteristic dimensions of tap water drops were 1 mm and its films on the walls of the gas gap ~ 0.1 mm. For these conditions, the following amplitude discharge parameters were achieved: the electric field strength in the gas gap was about 60 kV/cm, the current density – 2.6 A/cm², the electron concentration – $8.5 \cdot 10^{11}$ cm⁻³ with their average energy – 3.7 eV. The discharge becomes non-uniform: zones with bright filamentary formations appear in the gas gap when increasing of the frequency of repetition of voltage pulses over ≈ 300 Hz. The limiting frequency of the discharge transition into an inhomogeneous form becomes significantly higher (more than 500 Hz) with transverse purging of the gas gap with air, the speed of which at the entrance to the electrode system is ≈ 0.6 m/s.

Referenses 12, figures 7.

Keywords: uniform and non-uniform pulsed barrier discharge, air, atmospheric pressure, drops and a film of water.

Надійшла 26.03.2019

Остаточний варіант 23.04.2019