



Valeriy O. Pozdeev

**Поздєєв Валерій
Олександрович**



Victor M. Sichko
**Січко Віктор
Михайлович**



Dmytro O. Zhuk
**Жук Дмитро
Олександрович**



Oleksandr V. Melnyk
**Мельник
Олександр
Вікторович**

УДК 532.593

STUDY OF THE PRESSURE WAVE ON THE WALL OF A PULSATONAL SPHERICAL CAVITY DURING COLLAPSE

**ДОСЛІДЖЕННЯ ХВИЛІ ТИСКУ НА СТІНЦІ ПУЛЬСУЮЧОЇ
СФЕРИЧНОЇ ПОРОЖНИНИ ПРИ СХЛОПУВАННІ**

DOI [https://doi.org/10.15589/smi2026.1\(22\).04](https://doi.org/10.15589/smi2026.1(22).04)

Valeriy O. Pozdeev¹

Поздєєв Валерій Олександрович
valerii.pozdieiev@nuos.edu.ua
ORCID: 0000-0003-1224-7329

Victor M. Sichko¹

Січко Віктор Михайлович
victor.sichko@nuos.edu.ua
ORCID: 0000-0002-5231-9975

Dmytro O. Zhuk¹

Жук Дмитро Олександрович
dmytro.zhuk@nuos.edu.ua
ORCID: 0000-0002-7092-5717

Oleksandr V. Melnyk²

Мельник Олександр Вікторович
melnikaleksandr908@gmail.com
ORCID: 0000-0002-9778-4109

¹*Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv*

²*Separate Structural Subdivision of Higher Education Institution
«Open International University of Human Development «Ukraine»
Mykolaiv Institute of Human Development, Mykolaiv*

¹*Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова,
м. Миколаїв*

*Відокремлений структурний підрозділ закладу вищої освіти
«Відкритий міжнародний університет розвитку людини «Україна»
Миколаївський інститут розвитку людини, м. Миколаїв*

Abstract. The pressure field within confined discharge chambers with rigid walls significantly influences the efficiency of technological processes; therefore, its accurate determination is a relevant task. An electric discharge in the liquid medium of a chamber creates a cavity with significantly higher compressibility than the surrounding liquid. During the discharge stage, this cavity is filled with non-ideal plasma; subsequently, it transforms into a vapor-gas cavity composed of liquid vapor and gases. The pulsations of this cavity shape the pressure field within the discharge chamber. The moving boundary of the vapor-gas cavity presents significant challenges for calculating the pressure field in the fluid, particularly over multiple pulsation cycles. Currently, the role of the vapor-gas cavity in the formation of the pressure field is insufficiently studied, and investigating this influence is the objective of this work. The study is based on a previously developed mathematical model of electric discharge in water, supplemented in this work by relations that significantly improve the calculation accuracy of the discharge channel resistance and the energy released within it. It was determined that the pulsation of the vapor-gas cavity causes pressure oscillations within the cavity to be in antiphase with the pressure in the liquid. Furthermore, it was established that the amplitude of the second pressure pulse typically exceeds that of the first, and this difference becomes significant as the discharge parameters increase.

Key words: electric discharge in water; mathematical modeling; discharge channel; vapor-gas cavity; pressure field; discharge chamber.

Анотація. Поле тиску в розрядних камерах обмеженого об'єму з жорсткими стінками суттєво впливає на ефективність технологічних процесів, тому його визначення є актуальним завданням. Внаслідок електричного розряду в рідині, що заповнює камеру, утворюється порожнина, стисливість якої значно перевищує стисливість навколишньої рідини. На стадії розряду ця порожнина заповнена неідеальною плазмою, а після розряду – паром рідини та газами (парогазова порожнина). Її пульсації формують поле тиску в розрядній камері. Рухоме межа парогазової порожнини створює значні труднощі при розрахунку поля тиску в рідині, особливо за великої кількості циклів пульсації. На сьогодні роль парогазової порожнини у формуванні поля тиску вивчена недостатньо; визначення цього впливу є метою цієї роботи. Дослідження виконано на основі раніше розробленої математичної моделі електричного розряду у воді, яку в цій роботі доповнено співвідношеннями, що значно підвищують точність розрахунку опору розрядного каналу та енергії, що в ньому виділяється. Встановлено, що пульсація парогазової порожнини зумовлює коливання тиску в ній у протифазі з тиском у рідині. Визначено, що амплітуда другого імпульсу тиску завжди перевищує амплітуду першого, і зі збільшенням параметрів розряду ця різниця стає суттєвою.

Ключові слова: електричний розряд у воді; математичне моделювання; канал розряду; парогазова порожнина; поле тиску; розрядна камера.

References

- [1] Qiao, L., Zhang, X., Yan, B., & Liu, Y. (2021). An underwater discharge shockwave separation method based on minimum-phase cepstrum. *AIP Advances*, 11(9), Article 095109. <https://doi.org/10.1063/5.0064322>
- [2] Titova, Y. V., Stokozenko, V. G., & Maximov, A. I. (2010). Application of underwater discharge for modification of cellulose materials. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 38(4), 933. <https://doi.org/10.1109/TPS.2010.2042181>
- [3] Banozic, M., Jozinovic, A., Grgic, J., & Milicevic, B. (2021). High voltage electric discharge for recovery of chlorogenic acid from tobacco waste. *Sustainability*, 13(8), 4481. <https://doi.org/10.3390/su13084481>
- [4] Rizun, A. R., Denisyuk, T. D., & Domershchikova, A. O. (2017). Electric discharge in the process for recovering the wastes of printed circuit boards. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 53(6), 592. <https://doi.org/10.3103/S1068375517060096>
- [5] Sato, M., Sakugawa, T., Yamashita, T., & Hosano, N. (2020). Effects of voltage and current waveforms on pulse discharge energy transfer to underwater shock waves for medical applications. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 48(7), 2639. <https://doi.org/10.1109/TPS.2020.2992638>
- [6] Marcek, T., Kovac, T., Jukic, K., & Loncaric, A. (2021). Application of high voltage electrical discharge treatment to improve wheat germination and early growth under drought and salinity conditions. *Plants*, 10(10), 2137. <https://doi.org/10.3390/plants10102137>
- [7] Bian, D. C., Yan, D., Zhao, J. C., & Niu, S. Q. (2018). Experimental study of pulsed discharge underwater shock-related properties in pressurized liquid water. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018, Article 8025708. <https://doi.org/10.1155/2018/8025708>
- [8] Lee, K., Chung, K.-J., Hwang, Y. S., & Kim, C. Y. (2017). Underwater spark discharge with long transmission line for cleaning horizontal wells. *Journal of Applied Physics*, 121, Article 243302. <https://doi.org/10.1063/1.4986634>
- [9] Chung, K.-J., Lee, S., Hwang, Y. S., & Kim, C. Y. (2015). Modeling of pulsed spark discharge in water and its application to well cleaning. *Current Applied Physics*, 15(9), 977. <https://doi.org/10.1016/j.cap.2015.05.010>
- [10] Yan, B., Zhou, J., Zhao, L., & Liu, C. (2016). Experimental study on the discharging characteristics of pulsed high-voltage discharge technology in oil plug removal. *Journal of Power Technologies*, 96(4), 261.
- [11] Cai, Z., Zhang, H., Liu, K., & Chen, Y. (2020). Experimental investigation and mechanism analysis on rock damage by high voltage spark discharge in water: Effect of electrical conductivity. *Energies*, 13(20), Article 5432. <https://doi.org/10.3390/en13205432>
- [12] Khvoshchan, O. V., & Smirnov, A. P. (2022). Dependence of energy processes of high-voltage electric-discharge borehole complexes «SKIF» on characteristics of loading. *Technical Electrodynamics*, (1), 58. <https://doi.org/10.15407/techned2022.01.058>

- [13] Barbashova, G. A., & Vovchenko, A. I. (2016). Influence of the geometry of closed cylinder on hydrodynamic processes at a high-voltage electrochemical explosion. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 52(2), 176. <https://doi.org/10.3103/S1068375516020034>
- [14] Oshita, D., Hosano, H., Okuka, Y., & Miyamoto, Y. (2012). Characteristic of cavitation bubbles and shock waves generated by pulsed electric discharges with different voltages. *2012 IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference (IPMHVC)*, 102. <https://doi.org/10.1109/IPMHVC.2012.6518690>
- [15] Touya, G., Reess, T., Pécastaing, L., & Gibert, A. (2006). Development of subsonic electrical discharges in water and measurements of the associated pressure waves. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 39(24), 5236. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/39/24/021>
- [16] Zhao, Y., Liu, Y., Zhang, H., & Ren, Y.-J. (2022). Analysis of the bubble-pulsation process of underwater high current pulsed discharge. *Journal of Applied Physics*, 131, Article 083301. <https://doi.org/10.1063/5.0079162>

Вступ. Задача про випромінювання хвиль тиску в рідкому середовищі стінкою сферичної порожнини, що пульсує з періодичним схлопуванням, є актуальним для розрядно-імпульсних технологій. Зазвичай розглядається перша пульсація, так як вплив наступних пульсацій незначний, а в закритих об'ємах часто вже після першої пульсації порожнина руйнується. Поле тиску в розрядній камері, яке формується електричним розрядом у воді, має велике значення для розробки багатьох імпульсних технологій [1-9]. Однак його визначення пов'язане з проблемами вимірювання імпульсних тисків великої амплітуди та ускладнене наявністю потужного електромагнітного імпульсу, що супроводжує електричний розряд у воді.

Існуючі методи вимірювання тиску дозволяють його визначати лише в деяких точках порожнини розрядної камери [10, 11], за якими складно отримати повну характеристику поля тиску. Крім того, відстань від каналу розряду до точки вимірювання тиску повинна бути достатньо великою, щоб датчик тиску не зруйнувався від дії електромагнітного імпульсу та тиску ударних хвиль великої амплітуди в рідині, також до моменту початку вимірювання тиску вплив електромагнітних перешкод на датчик має бути дуже малим.

Оптичні методи дослідження дозволяють спостерігати зміну геометрії каналу розряду та парогозової порожнини, а також виникнення областей кавітації рідини [12-15], але не дають можливість визначити поле тиску в розрядній камері.

Методи математичного моделювання процесів у розрядній камері дозволяють отримати характеристики поля тиску [3, 4, 16], але, як правило, не забезпечують їх визначення протягом необхідного, досить тривалого проміжку часу, під час якого парогозова порожнина може здійснювати кілька пульсацій, формуючи при цьому нові хвилі тиску.

Зазначені причини не дозволили точно визначити роль парогозової порожнини, в яку перетворюється канал розряду після завершення процесу виділення в ньому енергії, що накопичується в конденсаторній батареї, у формуванні поля тиску в розрядній камері. Тому дослідження впливу парогозової порожнини на поле тиску в замкнутій розрядній камері є актуальним завданням, яке формує мету дослідження – визначити зв'язок між характеристиками парогозової порожнини та полем тиску в замкнутій розрядній камері з жорсткими стінками.

Постановка задачі. В роботах [2-4] показано, що при електричному розряді в рідині профіль імпульсу при схлопуванні порожнини і подальшому її розширенні має більш складну структуру в порівнянні з профілем хвилі тиску при початковому розширенні, а амплітуда другого імпульсу в ряді випадків може бути більшою ніж амплітуда першого. Цей факт має експериментальне підтвердження (рис. 1). Таким чином, можна припустити, що на післярозрядній стадії рідини генеруються досить високі рівні тисків.

Мета дослідження. Метою даної є теоретичне обґрунтування виникнення досить високих рівнів імпульсу тиску при першому схлопуванні порожнини.

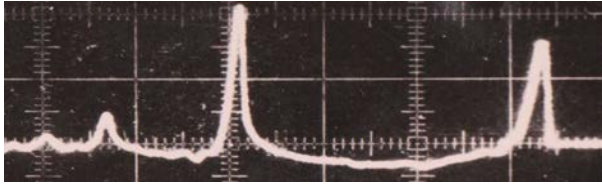


Рис. 1. Профіль імпульсів хвилі тиску при підводному іскровому розряді

Методи, об'єкт та предмет дослідження. Для дослідження використовували математичну модель електричного розряду у воді, в якій враховано процеси в розрядно-му контурі, каналі розряду та навколишньої рідини, що заповнює замкнуту розрядну камеру циліндричної форми. У запропонованій роботі модель доповнена співвідношеннями, що дозволяють суттєво підвищити точність обчислення опору каналу розряду після першої чверті періоду коливання струму в розрядному ланцюзі, використовуючи рівняння для питомої електропровідності плазми та інші замикаючі співвідношення.

Основний матеріал. Обмежимося розглядом зовнішньої гідродинамічної задачі з такими припущеннями:

- лінійний закон зміни радіусу порожнини в часі (стадія розширення – $R_{II} = R_0 + v_0 t$, стадія схлопування – $R_{II} = R_m - v_0 t$, де R_0 , R_m – нульовий та максимальний радіуси порожнини відповідно; t – поточний момент часу), що можна прийняти на початковій стадії розширення та кінцевій стадії схлопування порожнини;

- втрати при випромінюванні не враховуються;

- швидкість розширення порожнини в початковий момент часу кожної пульсації однакова і дорівнює $v_0 = \omega R_m$, де ω – частота пульсації порожнини;

- швидкість захлопування порожнини дорівнює швидкості розширення по абсолютній величині, але протилежна за напрямом.

Рух порожнини у рідині можна описати системою рівнянь:

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial \Phi}{\partial r} - \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} = 0;$$

$$v = \frac{\partial \Phi}{\partial r}, \quad p = -\rho_0 \frac{\partial \Phi}{\partial t}; \quad v|_{r=R_{II}(t)} = v_{II}(t), \quad p|_{r=R_{II}(t)} = p_{II}(t)$$

де Φ – потенціал швидкостей руху рідини; r – радіальна координата; c_0 – швидкість звуку в незбуреній рідині; ρ_0 – щільність рідини; v_{II} – швидкість руху стінки порожнини; p_{II} – тиск рідини на стінку порожнини.

При цьому потенціал швидкостей повинен задовольняти нульовим початковим умовам та умові джерела збурення. Зазначимо, що профіль тиску в інших точках рідини зменшується по амплітуді, якісно зберігаючи форму тиску на стінці порожнини.

Частковий розв'язок задачі руху стінки порожнини для випадку $R_{II} = R_0 + v_0 t$ отримано методом нелінійного перетворення часу при завданні граничних умов на рухомих границях. Так відповідно з цим аналітичним розв'язком наведено наближені оцінки відносних амплітуд першої та другої пульсації порожнини

$$\bar{P} = \frac{p_{II}(r)}{\rho_0 c_0^2}.$$

Амплітуда першого імпульсу (початкова стадія розширення) дорівнює $\bar{P}_1 = \mu$,

тут $\mu = \frac{v_0}{c_0}$. Амплітуда другого імпульсу складається з двох складових, $\bar{P}_2 = \bar{P}_{21} + \bar{P}_{22}$ де $\bar{P}_{21}$ – імпульс тиску від повторного розширення порожнини; $\bar{P}_{22}$ – імпульс тиску, що виникає в кінці процесу схлопування.

$$\bar{P}_{21} = \mu;$$

$$\bar{P}_{22} = \frac{2\mu^2}{1-\mu}.$$

Тоді амплітуду другого імпульсу можна оцінити виразом

$$\bar{P}_2 = \mu \frac{1+\mu}{1-\mu}.$$

Аналогічно можна отримати залежність для тиску на стінці порожнини у процесі її схлопування:

$$\bar{P}_R = \frac{2\mu^2}{1-\mu} \left[1 - \frac{1+\mu}{2\mu} (1-\mu\tau)^{\frac{1-\mu}{\mu}} \right], \quad \text{де } \tau = \frac{c_0 t}{R_0}.$$

Обговорення отриманих результатів.

Оцінимо рівні тиску на стадії схлопування порожнини при різних значеннях параметра μ у часовому діапазоні $0 \leq \tau \leq 1/\mu$. Результати розрахунків наведено на рис. 2. Область досягнення порожниною мінімального радіусу і максимальних рівнів тисків при схлопуванні обмежена пунктирною лінією. На рис. 3

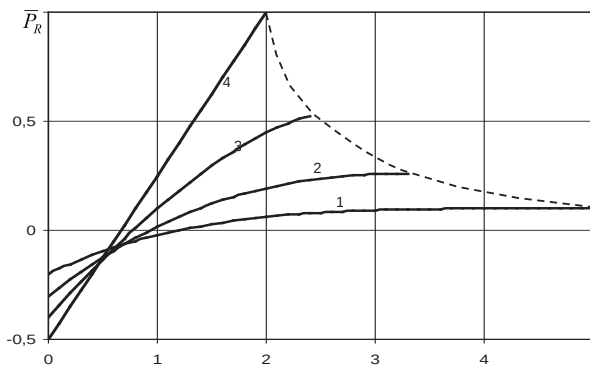


Рис. 2. Імпульс тиску при схлопуванні сферичної порожнини за лінійним законом: 1 – $\mu=0,2$; 2 – $\mu=0,3$; 3 – $\mu=0,4$; 4 – $\mu=0,5$

представлені залежності амплітуд імпульсів тиску для першої та другої пульсацій.

Висновки

Таким чином, з урахуванням запропонованих припущень теоретично показано, що амплітуда другого імпульсу тиску завжди буде більше першого, причому зі збільшенням параметра μ ця різниця проявляється суттєво.

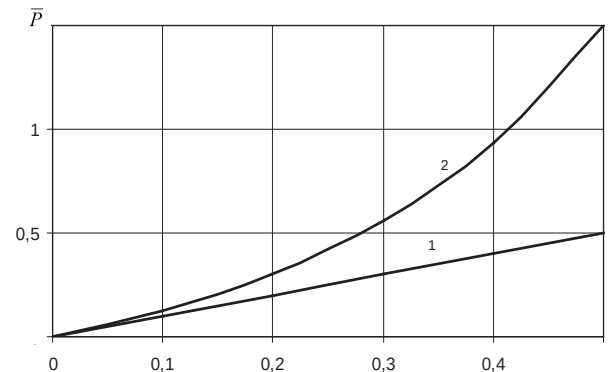


Рис. 3. Амплітуди імпульсів тиску при схлопуванні:
1 – перший імпульс $\bar{P}_1$; 2 – другий імпульс $\bar{P}_2$

Список літератури

- [1] Qiao, L., Zhang, X., Yan, B., & Liu, Y. (2021). An underwater discharge shockwave separation method based on minimum-phase cepstrum. *AIP Advances*, 11(9), Article 095109. <https://doi.org/10.1063/5.0064322>
- [2] Titova, Y. V., Stokozenko, V. G., & Maximov, A. I. (2010). Application of underwater discharge for modification of cellulose materials. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 38(4), 933. <https://doi.org/10.1109/TPS.2010.2042181>
- [3] Banozic, M., Jozinovic, A., Grgic, J., & Milicevic, B. (2021). High voltage electric discharge for recovery of chlorogenic acid from tobacco waste. *Sustainability*, 13(8), 4481. <https://doi.org/10.3390/su13084481>
- [4] Rizun, A. R., Denisyuk, T. D., & Domershchikova, A. O. (2017). Electric discharge in the process for recovering the wastes of printed circuit boards. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 53(6), 592. <https://doi.org/10.3103/S1068375517060096>
- [5] Sato, M., Sakugawa, T., Yamashita, T., & Hosano, N. (2020). Effects of voltage and current waveforms on pulse discharge energy transfer to underwater shock waves for medical applications. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 48(7), 2639. <https://doi.org/10.1109/TPS.2020.2992638>
- [6] Marcek, T., Kovac, T., Jukic, K., & Loncaric, A. (2021). Application of high voltage electrical discharge treatment to improve wheat germination and early growth under drought and salinity conditions. *Plants*, 10(10), 2137. <https://doi.org/10.3390/plants10102137>
- [7] Bian, D. C., Yan, D., Zhao, J. C., & Niu, S. Q. (2018). Experimental study of pulsed discharge underwater shock-related properties in pressurized liquid water. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018, Article 8025708. <https://doi.org/10.1155/2018/8025708>
- [8] Lee, K., Chung, K.-J., Hwang, Y. S., & Kim, C. Y. (2017). Underwater spark discharge with long transmission line for cleaning horizontal wells. *Journal of Applied Physics*, 121, Article 243302. <https://doi.org/10.1063/1.4986634>
- [9] Chung, K.-J., Lee, S., Hwang, Y. S., & Kim, C. Y. (2015). Modeling of pulsed spark discharge in water and its application to well cleaning. *Current Applied Physics*, 15(9), 977. <https://doi.org/10.1016/j.cap.2015.05.010>

- [10] Yan, B., Zhou, J., Zhao, L., & Liu, C. (2016). Experimental study on the discharging characteristics of pulsed high-voltage discharge technology in oil plug removal. *Journal of Power Technologies*, 96(4), 261.
- [11] Cai, Z., Zhang, H., Liu, K., & Chen, Y. (2020). Experimental investigation and mechanism analysis on rock damage by high voltage spark discharge in water: Effect of electrical conductivity. *Energies*, 13(20), Article 5432. <https://doi.org/10.3390/en13205432>
- [12] Khvoshchan, O. V., & Smirnov, A. P. (2022). Dependence of energy processes of high-voltage electric-discharge borehole complexes "SKIF" on characteristics of loading. *Technical Electrodynamics*, (1), 58. <https://doi.org/10.15407/techned2022.01.058>
- [13] Barbashova, G. A., & Vovchenko, A. I. (2016). Influence of the geometry of closed cylinder on hydrodynamic processes at a high-voltage electrochemical explosion. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 52(2), 176. <https://doi.org/10.3103/S1068375516020034>
- [14] Oshita, D., Hosano, H., Okuka, Y., & Miyamoto, Y. (2012). Characteristic of cavitation bubbles and shock waves generated by pulsed electric discharges with different voltages. *2012 IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference (IPMHVC)*, 102. <https://doi.org/10.1109/IPMHVC.2012.6518690>
- [15] Touya, G., Reess, T., Pécastaing, L., & Gibert, A. (2006). Development of subsonic electrical discharges in water and measurements of the associated pressure waves. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 39(24), 5236. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/39/24/021>
- [16] Zhao, Y., Liu, Y., Zhang, H., & Ren, Y.-J. (2022). Analysis of the bubble-pulsation process of underwater high current pulsed discharge. *Journal of Applied Physics*, 131, Article 083301. <https://doi.org/10.1063/5.0079162>

© Поздєєв В. О., Мельник О. В., Січко В. М., Жук Д. О.

Дата першого надходження статті до видання: 12.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 23.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 15.05.2026



Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0