



АБРАМОВ СЕРГІЙ ОЛЕКСІЙОВИЧ

кандидат технічних наук, доцент,
старший науковий співробітник науково-дослідної лабораторії
з підготовки військ,
Київський інститут Національної гвардії України
<https://orcid.org/0000-0003-0675-4850>



ТИТАРЕНКО ОЛЕКСІЙ ОЛЕКСІЙОВИЧ

доктор юридичних наук, доцент,
начальник науково-дослідної лабораторії
з підготовки військ,
Київський інститут Національної гвардії України
<https://orcid.org/0000-0002-3271-9402>

**ВИКОРИСТАННЯ РОЗМІРНИХ І БЕЗРОЗМІРНИХ КОМПЛЕКСІВ,
ЩО ОПИСУЮТЬ ВИБУХ**

Досліджено процеси розроблення та верифікації системи розмірних і безрозмірних комплексів, які адекватно описують фізику електричного вибуху провідників у широкому діапазоні режимів, уможливаючи прогнозне масштабування і керування процесом.

В умовах, коли параметри джерела і геометрія провідника можуть змінюватись у широких межах, процес електричного вибуху провідників є гнучким технічним інструментом. Розглянуто вплив основних параметрів джерела живлення – ємності конденсаторної батареї (C), індуктивності розрядного контуру (L) і початкової напруги (U_0), – а також геометрії провідника на кінетику енергетичних перетворень під час електричного вибуху провідників. Показано, що зміна цих параметрів дає змогу варіювати швидкість виділення енергії, часову еволюцію струму й напруги, температуру та об'єм плазми, що безпосередньо визначає інтенсивність механічних (ударна хвиля, тиск) і електрооптичних (світіння, спектр випромінювання) ефектів. Для кожної групи визначено фізичний зміст, межі застосовності та її вплив на пік надлишкового тиску, тривалість позитивної фази, імпульс, а також характеристики випромінювання й розмірно-енергетичний розподіл частинок у випадку синтезу наноматеріалів.

Методологія поєднує аналітичні розрахунки, масштабоване експериментальне дослідження серій розрядів із варіюванням C , L , U_0 , геометрії провідника і властивостей середовища. Очікуваними результатами є універсальні емпіричні та напіваавтоматизовані кореляції, що дають змогу керувати характеристиками електричного вибуху провідників для конкретних застосувань: імпульсне джерело світла з контрольованим спектром і тривалістю, керований генератор ударних хвиль для дослідницьких і промислових потреб, адаптивні переривники імпульсних струмів.

Отримані результати можливо використовувати для розроблення імпульсних джерел світла з контрольованим спектром, генераторів ударних хвиль і адаптивних комутаційних систем у високовольтній техніці, а також для розроблення установки з виявлення й розмінування водних логістичних маршрутів для підрозділів оперативного призначення Національної гвардії України в умовах виконання бойових завдань.

Ключові слова: вибух; параметр; установка; струм; вплив; провідник.

Постановка проблеми. Можливість зміни характеристик електричного вибуху провідників (ЕВП) у широкому діапазоні за рахунок регулювання електротехнічних параметрів джерела, зміни геометрії провідника або

властивостей навколишнього середовища робить його легко налаштовуваним інструментом, що суттєво розширює спектр його застосування [1, 2, 3]. Зміна ємності конденсаторної батареї, індуктивності розрядного контуру L або

початкової напруги U_0 може істотно змінити як швидкість виділення енергії у процесі вибуху, так і кількість енергії, що виділяється під час ЕВП. Це дає змогу використовувати провідник, що вибухає, як імпульсне джерело світла, джерело ударних хвиль (УХ), переривник імпульсних струмів, інструмент для отримання наноматеріалів із можливістю регулювати розміри частинок [4] і т. ін.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

У такому випадку актуалізується завдання знаходження параметрів дроту та контуру для реалізації конкретного технологічного впливу. Про класифікацію вибуху та інструментарій для визначення необхідних параметрів ідеться у статті [5]. У праці [6] вперше здійснено класифікацію різних типів ЕВП за низкою різних характеристик. Питання щодо параметрів і комплексів, які найповніше можуть охарактеризувати результати експериментів із вибуху, порушувалися й у більш ранніх працях. Так, у [7] під час дослідження електричних та оптичних характеристик вибуху провідників до моменту вибуху будувалися залежності від щільності струму об'ємної щільності енергії W/V для провідників із різних матеріалів (у більш пізніх роботах використовувалася щільність енергії W/m). У цих працях уперше було запропоновано використовувати ще одну змінну величину – так званий інтеграл дії:

$$S_i = \int_0^t I^2 dt, \quad (1)$$

де I – струм у каналі розряду.

Такі підходи до класифікації та аналізу результатів активно використовуються й сьогодні [8, 9].

Використовується також іще один підхід до проблеми, який засновано на застосуванні методів розмірності й подібності до дослідження ЕВП [10]. У працях окремих науковців показано, що ідентичні осцилограми, які характеризуються однаковою фазою спаду, її глибиною та величиною вторинного імпульсу струму розряду, можуть бути отримані у різних поєднаннях параметрів провідника, що вибухає. Наявність ідентичних електричних характеристик дало змогу припустити існування подоби явища. Проаналізувавши масив експериментальних даних і фізичних процесів, що відбуваються на різних стадіях вибуху, ці дослідники отримали деякі безрозмірні комплекси – критерії подібності, за збереження яких незмінними електричні характеристики вибуху для цих стадій збігалися. Перевагами такого підходу є явний аналітичний вид

одержаних виразів і можливість на їх основі передбачати вид електричних характеристик під час ЕВП у різних режимах.

Мета дослідження – з'ясувати питання щодо того, як співвідносяться між собою два підходи, засновані на аналізі розмірних і безрозмірних комплексів, що описують вибух, а також наскільки можна їх використовувати для передбачення параметрів течій, які виникають під час електричного вибуху і, особливо, ударних хвиль.

Виклад основного матеріалу. Для визначення впливу різних факторів і параметрів електровибуху, як вихідних (струм, напруга, довжина провідника тощо), так і комплексних (запасена енергія, критерії подібності тощо), на амплітуду ударної хвилі (УХ), що генерується вибухом, скористаємося широко відомими експериментальними даними, наведеними в [10], для аналізу впливу зміни безрозмірних критеріїв подібності до електричних характеристик ЕВП. Окрім комбінації параметрів розрядного контуру і набору величин, що характеризують властивості матеріалу провідника, отримані у цій праці критерії охоплюють також геометричні параметри провідників. Так, критерій Π_2 містить діаметр провідника d_w :

$$\Pi_2 = \frac{1}{S^2 \gamma_0 \sigma_0 (\lambda_m + \lambda_b)} \cdot \frac{c^{3/2} U_0^2}{L^{1/2}}, \quad (2)$$

а критерій Π_3 – його довжину l_w :

$$\Pi_3 = \frac{A l^2}{U_0^2 \sqrt{LC}}. \quad (3)$$

Тут γ_0 – щільність, σ_0 – питома електропровідність, λ_m та λ_b – питомі теплоти плавлення й випаровування матеріалу провідника. Вони характеризують індивідуальні властивості металу провідника. У (2) S – площа перерізу провідника, $S = \pi d^2/4$, у (3) $A = 10^4$ (В²·с)/м² – іскрова постійна, яка не залежить від матеріалу провідника.

Для демонстрації впливу зміни цих параметрів на характер вибуху в [10] наведено безрозмірні осцилограми струму під час електричного вибуху мідних провідників, що ілюструють зміну фази різкого спаду струму при варіюванні Π_2 за рахунок зміни діаметра провідника d_w (Π_3 і довжина провідника залишаються l_w незмінними). Із наведених осцилограм струму випливає, що зі збільшенням діаметра провідника, що вибухає, перший максимум струму збільшується так само, як і час до вибуху. При цьому початкові ділянки зростання струму збігаються зі струмом короткого замикання і між собою. Ілюструючи вплив зміни Π_3 (змінюється l_w ,

d_w не змінюється) на характер вибуху, подається ще одне сімейство осцилограм струму. На фазу вибуху зміна довжини провідника впливає слабо. Третє сімейство осцилограм наводиться для доведення наявності подібності електричних характеристик вибуху в різних режимах при збереженні рівності одночасно і P_2 , і P_3 . При цьому практично всі розмірні параметри, які характеризують режим вибуху, можуть змінюватися досить суттєво.

Основні електричні параметри і параметри провідників, що вибухають, для цих трьох випадків подано у табл. 1. У групі I під номерами від 1 до 3 наводяться значення параметрів при постійних P_3 та l_w , у групі II під номерами від 4 до 9 – при незмінних P_2 та d_w . Група параметрів, позначених у табл. 1 як III (номери від 10 до 13), відповідає тій ситуації, коли приведені криві струму розряду подібні (оскільки практично збігаються) для різних режимів, у яких збігаються P_2 і P_3 .

У таблиці 1 U_0 – початкова напруга на конденсаторній батареї, C – ємність конденсаторної батареї, L – індуктивність розрядного ланцюга, $I_{\max} = U_0/\sqrt{L/C}$ – максимальний струм, l_w , d_w – довжина та діаметр провідника, W_0/m – відношення запасеної енергії до маси провідника, P_2 та P_3 – критерії подібності.

Математична модель, що описує течії, які виникають під час підводного електровибуху (ПЕВ), містить цілу низку співвідношень, що описують складний нелінійний процес руйнування провідника під дією великих імпульсів струму, процес джоулевого нагріву і розширення плазми каналу розряду і т. ін., систему рівнянь гіперболічного типу для опису поведінки газодинамічних параметрів у просторі включно. Такі системи рівнянь не підлягають аналітичним рішенням, тому задача розв'язувалася чисельними методами. Для математичного опису ЕВП використовувалася запропонована у [11] тепла модель вибуху. Адіабатичний нагрів провідника у моделі опису системою рівнянь із безрозмірними змінними:

$$\begin{cases} i'' + R_0 C \omega (i r)' + i = 0; \\ \theta' = \left(I_m^2 R_0 / c_p m_w T_c \omega \right) i^2 r, \\ r = (1 - \theta)^{-n}, \end{cases} \quad (4)$$

який містить рівняння розрядного RLC-ланцюга (R – опір, Ом), рівняння теплового балансу, а також рівняння зв'язку опору провідника з температурою. Тут $i = I/I_{\max}$,

I – розрядний струм у ланцюгу; $r = R/R_0$; $\theta = T/T_c$, U_0 – початкова напруга; R_0 – опір при вихідній температурі T_0 , °С; T_c – критична температура; c_p – теплоємність [c_p] = Дж/(кг·К); m_w – маса провідника [m_w] = кг. Штрихом позначена похідна по $\tau = \omega t$ (t – час, $\omega = (LC)^{-1/2}$). Із системи (4) нескладно виключити температуру. Об'єднуючи друге і третє рівняння системи, можна записати $\theta = (I_m^2 R_0 / c_p m_w T_c \omega) i^2 (1 - \theta)^{-n}$. Проінтегрувавши останнє при нульових початкових умовах ($\tau = 0$, $\theta(0) = \theta_0$), отримаємо залежність опору від інтеграла дії S_i у вигляді [12]:

$$r = \left(1 - P_2 \int_0^\tau i^2 d\tau \right)^{-\frac{n}{n+1}}, \quad (5)$$

де $n \approx 3,5$ – показник степеня. Спільне розв'язання струмового рівняння системи (4) і співвідношення (5) дає залежність опору провідника і струму будь-якій фазі вибуху провідника. Початкові умови для розв'язання системи (4):

$$r(0) = 1, i(0) = 0, \theta(0) = \theta_0. \quad (6)$$

Для «індивідуалізації» перебігу рідини необхідно пов'язати розв'язання задачі про вибух провідника із задачею про течії шляхом визначення умов на контактний розрив. Використовуємо рівняння, що описує переміщення поверхні провідника при тепловому розширенні. Радіальне теплове розширення провідника лінійно залежить від температури $a = a_0(1 + \alpha T)$, тому швидкість розширення (при $\alpha = \text{const}$, де α – лінійний коефіцієнт теплового розширення, a – радіус провідника) дорівнюватиме:

$$a' = P_a i^2 r, \quad (7)$$

де $P_a = \alpha I_m^2 R_0 / c_p m_w \omega$. Тут використовували баланс енергії із системи (4) для виключення температури. Розв'язання системи (4) у модифікованому за допомогою (7) вигляді та за наявності (6) дає закон теплового розширення провідника, необхідний для деталізації течії під час підводного електровибуху провідників.

Плазмова (дугова) стадія підводного електровибуху може бути описана у межах моделі, розробленої у [13]. Баланс енергії для каналу розряду у цьому разі записується так:

$$(\gamma_a - 1)^{-1} (\tilde{P} F)' + \tilde{P} F' = 2 P_1 i^2 r / \pi, \quad (8)$$

де P , F , i , r – безрозмірні тиск, переріз, струм і опір каналу розряду, відповідно:

$$F = S/S_{ef}, \tilde{P} = P/P_{ef}, S = \pi a^2; S_{ef} = \pi U_0^2 (C/\omega^2 \gamma_0 l)^{1/2}; P_{ef} = \gamma_0 S_{ef} \omega^2 / 2\pi.$$

Таблиця 1 – Основні електричні параметри і параметри підривних провідників

		$U_0,$ 10^3 В	$C,$ 10^{-6} Ф	$L,$ 10^{-6} Г	$I_{\max},$ 10^3 А	$l_w,$ 10^{-3} А	$d_w,$ 10^{-3} м	$W_0/m,$ 10^6 Дж/м	$\Pi_2, 10^{-1}$	$\Pi_3, 10^{-2}$	Π_2/Π_3
I	1	14	99,0	3	80,4	100	0,40	86,46	36,10	2,960	122,00
	2	»	»	»	»	»	0,50	55,33	14,80	»	50,00
	3	»	»	»	»	»	0,68	29,92	4,33	»	14,60
II	4	»	»	10	44,0	20	0,50	276,70	8,10	0,065	10^3
	5	»	»	»	»	40	»	138,30	»	0,259	312,00
	6	»	»	»	»	100	»	55,33	»	1,620	50,00
	7	»	»	»	»	140	»	39,52	»	3,180	25,50
	8	»	»	»	»	180	»	30,74	»	5,250	15,40
	9	»	»	»	»	260	»	21,28	»	11,000	7,39
III	10	40	3,0	2,26	46,1	116	0,30	32,78	5,66	3,230	17,50
	11	18	34,6	2,53	66,6	100	0,51	30,73	5,08	3,300	15,40
	12	14	99,0	3,00	80,4	100	0,66	31,76	4,87	2,960	16,50
	13	8	48,0	10,60	17,0	67	0,33	30,02	4,57	3,110	14,70

Для визначення електричного опору каналу розряду використовується встановлене співвідношення [10]:

$$r = \frac{Al(\gamma_a - 1)}{R_0 P_{ef} S_{ef}} (\tilde{P}) F^{-1}. \quad (9)$$

Рівняння (8) і (9) разом зі струмовим рівнянням (4) утворюють систему рівнянь для визначення граничних умов, що використовуються для розв'язання крайової задачі. Початкові умови вибираються «природні» – радіус каналу розряду, поле тисків і швидкостей у розрахунковій області відомі на момент «перемикання» провідник – канал розряду.

Система нестационарних рівнянь газової динаміки з однією просторовою змінною у диференційній формі (у змінних Ейлера) має такий вигляд [14]:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial t}(x^v \gamma) + \frac{\partial}{\partial x}(x^v \gamma u) = 0; \\ \frac{\partial}{\partial t}(x^v \gamma u) + \frac{\partial}{\partial x}(x^v (p + \gamma u^2)) = v x^{v-1} p; \\ \frac{\partial}{\partial t} \left[x^v \gamma \left(\varepsilon + \frac{u^2}{2} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[x^v \lambda u \left(\varepsilon + \frac{u^2}{2} \right) \right] = 0, \end{cases} \quad (10)$$

де x, t – Ейлерові координати; γ – щільність; ε – питома внутрішня енергія газу; p – тиск; показник $v = 0$ у разі плоскої, $v = 1$ у разі циліндричної, $v = 2$ – сферичної симетрії течії.

Течії, що виникають під час ПЕВП, як правило, мають циліндричну симетрію, тому надалі вважатимемо, що $v = 1$. Для однозначного опису течії система (10) доповнюється рівнянням стану рідини у формі Тейта:

$$P = G \left(\frac{\gamma}{\gamma_0} \right)^x - B, \quad (11)$$

де G, χ, B – константи. Початкові умови системи (10) мали вигляд $P(0, x) = P_\infty, u(0, x) = 0, a_0 < x < x_b$, де x_b – радіус циліндра (розрахункової області). На поверхні провідника (каналу) і межі розрахункової області ставилися граничні умови непротікання. Провідник розташовувався співвісно зі жорсткою циліндричною оболонкою діаметром 11 мм.

Розв'язання системи (4) здійснювалося за формулою корекції для одновимірного випадку у поєднанні з методом Рунге-Кутта з використанням на кожному кроці прямих ітерацій. Інтегрування рівнянь системи на малому часовому інтервалі Δt проводилося за штучними формулами корекції, отриманими з інтерполяційних співвідношень. Ураховуючи дещо Δt , для інтегрування функцій використовувалася формула трапецій, створення функцій інтегрувалося за штучними формулами.

Система рівнянь (10), (11) із початковими і граничними умовами зазвичай розв'язувалася за різницевим методом С. К. Годунова [14]. Тестування моделі проводилося шляхом порівняння результатів розрахунку з експериментальними даними [15].

Деякі результати розрахунку вибуху провідників у воді за зазначеними у табл. 1 параметрами контуру та провідника подано у табл. 2. Нумерація рядків і груп параметрів відповідає нумерації у табл. 1. Наприклад, у

рядку 1 наведено результати розрахунку ПЕВ із параметрами, зазначеними у табл. 1, рядок 1. Тут P_a – тиск на стінці у момент приходу ударної хвилі, N_{\max} – максимальна потужність, N_{\max}/l_w – максимальна потужність на одиницю довжини каналу, I_{ex} – значення струму під час вибуху, I_{ex}/I_{\max} – відносне (наведене) значення струму у момент вибуху, S_i – інтеграл дії, t_{ex} – час вибуху, $t_{ex}/\pi\sqrt{LC}$ – наведений час вибуху, W_{ex} – енергія, що виділилась у провіднику на момент вибуху, W_{ex}/m – відношення енергії, що виділилась у провіднику на момент вибуху, до маси провідника.

Зіставляючи результати розрахунку вибуху провідників у воді (див. табл. 2) з вихідними електричними параметрами й параметрами вибухових провідників (див. табл. 1), можна відзначити їх відповідність у деяких випадках і цілковиту невідповідність – в інших. Розглянемо насамперед, як це проявляється для окремих груп параметрів.

Група I. За незмінних параметрів контуру та критерію Π_3 (що відповідає за дугову стадію розряду [10]) зменшуємо критерій Π_2 за рахунок зростання діаметра провідника. При цьому також зменшуються W_0/m та Π_2/Π_3 . Тиск P_a зростає, як і решта вимірюваних параметрів, наведених у табл. 2. Можна було б зробити висновок про те, що першопричиною цього є збільшення діаметра провідника, якби не припустити, що зміна параметрів, зафіксованих у цьому досліді, може дати інші результати.

Група II. Тут ми збільшуємо Π_3 за рахунок збільшення довжини провідника, всі інші параметри зафіксовано. Знову синхронно зменшуються W_0/m та Π_2/Π_3 . Тиск загалом за групою параметрів зі збільшенням довжини провідників падає. Випадає із загального тренду лише режим № 8. Звертає на себе увагу той факт, що зі збільшенням довжини провідника у 13 разів тиск зменшується не більше ніж на 16 %. Максимальна потужність зі збільшенням довжини провідника зростає, а потужність на одиницю довжини провідника загалом трохи знижується. Усі інші вимірювані параметри або незначно зростають, або залишаються незмінними. Слід також зауважити, що в цій групі подано провідник (7), геометричні параметри якого збігаються з № 2 (група I), а з електричних параметрів

відрізняється лише значення індуктивності контуру. Розрахунковий тиск для провідника з першої групи ($L = 3 \cdot 10^{-6}$ Г) значно більше, ніж провідника з другої групи ($L = 10^{-5}$ Г), що дає змогу зробити висновок про вплив тимчасового фактора на величину тиску під час ПЕВ.

Група III. Це група параметрів, за яких струмові характеристики ПЕВ подібні при великій різниці геометричних параметрів провідників і параметрів контуру [10]. Можна також зауважити про великий розкид у поведінці тиску – від № 10 до № 12 зростання (до 35 %), і суттєво менше (у 1,6 ÷ 2,5 разу) значення для № 13. До того ж значення N_{\max} для цих параметрів близькі, а N_{\max}/l_w значно менше саме для № 13. Для цього ж самого режиму найбільший у групі час вибуху і найменше значення енергії, що виділилась у провіднику на момент вибуху. Можливо, такі особливості вибуху пов'язані з тим, що в зазначеному режимі початкова напруга мінімальна, а відносно великі ємність та індуктивність. Одночасно діють кілька факторів. Так чи інакше, але неможливість виділити у III групі основний фактор або групу факторів, відповідальних за такий характер поведінки розрахункового тиску в разі зміни всіх параметрів, свідчить про те, що характер поведінки є дійсно багатофакторним і пов'язати всі ці фактори разом поки неможливо.

Загалом із наведених у табл. 1 розрахункових параметрів і тих, що вимірюються, відносно добре корелюють зі значенням тиску на стінці камери значення N_{\max} , N_{\max}/l_w , критеріїв Π_2 , Π_3 , їх відношення Π_2/Π_3 та W_0/m . Для попередніх оцінок характеристик вибуху ці параметри застосовуються давно, водночас, як зазначалося, деякі з них є критеріями подібності. Питання виникає лише стосовно правомірності використання цих цілей відношення W_0/m . Нам відомо [16], що з оптимальних режимів електровибуху відношення $(W_0/m)_{opt}$ залежить від властивостей металу провідника, тобто є інваріантним щодо параметрів розрядного контуру і розмірів провідників:

$$\left(W_0/m\right)_{opt} = \sqrt{10^2 A} \cdot \left[\frac{\sigma_0 \cdot (\lambda_m + \lambda_b)}{8\pi^2 \gamma_0}\right]^{1/2}. \quad (12)$$

Таблиця 2 – Результати розрахунку вибуху провідників у воді

		$P_a, 10^9$ Па	$N_{max}, 10^9$ Вт	$N_{max}/l_w, 10^9$ Вт/м	$I_{ex}, 10^3$ А	I_{ex}/I_{max}	$S_i, 10^3$ А ² с	$t_{ex}, 10^{-6}$ с	$\frac{t_{ex}}{\pi \sqrt{LC}}$	$W_{ex},$ Дж	$W_{ex}/m, 10^6$ Дж/кг
I	1	0,260	5,89	58,9	40,00	0,498	6,05	9,89	0,183	672	5,990
	2	0,298	6,29	62,9	52,60	0,654	14,80	13,50	0,250	1047	5,969
	3	0,339	6,13	61,3	71,30	0,886	50,50	21,70	0,400	1945	5,997
II	4	0,240	0,57	28,4	35,70	0,810	14,80	30,20	0,305	210	5,995
	5	0,237	1,16	28,9	35,40	0,804	14,80	30,30	0,306	421	6,015
	6	0,227	2,54	25,4	34,50	0,784	14,80	30,60	0,310	1050	5,989
	7	0,221	3,80	27,1	33,93	0,770	14,80	30,90	0,312	1479	6,026
	8	0,225	4,45	24,7	33,40	0,758	14,80	31,10	0,315	1898	6,012
	9	0,202	5,90	22,7	38,10	0,729	14,80	31,60	0,320	2737	6,003
III	10	0,218	10,30	88,6	38,60	0,838	1,91	2,94	0,359	438	5,979
	11	0,301	6,98	69,8	57,00	0,857	16,00	11,00	0,375	1095	6,004
	12	0,337	6,27	62,7	69,70	0,867	44,80	20,60	0,381	1835	6,008
	13	0,133	7,70	11,5	14,90	0,867	28,00	27,70	0,392	307	6,008

Розглянемо вираз для експериментально певних критеріїв подібності до електричних характеристик вибуху провідників (2). Якщо взяти відношення другого критерію подібності до Π_2 (2), що характеризує безпосередньо фазу вибуху, до Π_3 (3), що стосується дугової стадії розряду, то нескладно отримати вираз:

$$\frac{\Pi_2}{\Pi_3} = \frac{4}{A} \left(\frac{W_0}{m} \right)^2 \cdot \frac{\gamma_0}{\sigma_0(\lambda_m + \lambda_b)}. \quad (13)$$

Використовуючи вираз (12), маємо:

$$\frac{W_0}{m} = \frac{\pi\sqrt{2}}{10} \left(\frac{W_0}{m} \right)_{opt} \left(\frac{\Pi_2}{\Pi_3} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (14)$$

Залежність W_0/m для довільного режиму вибуху провідника містить відношення критеріїв подібності та постійну для цього металу величину $(W_0/m)_{opt}$. Із виразу (13) випливає, що відношення запасеної енергії до маси провідника для будь-якого режиму ПЕВ, незважаючи на те, що це розмірна величина, може розглядатись як критерій подібності електричних характеристик вибуху провідника, оскільки охоплює відношення відомих критеріїв та величину $(W_0/m)_{opt}$, що залежить тільки від властивостей матеріалу провідника.

Висновки й перспективи подальших досліджень. Розглянуто різні підходи до класифікації видів електричного вибуху провідників у рідині, а також до їх застосування. Показано, що для опису електричних характеристик вибуху ці підходи приблизно рівнозначні. Застосування підходу з використанням критеріїв подібності для передбачення характеру вибуху, на нашу думку, технологічніше, оскільки вони записані в явному

аналітичному виді. Оцінювання показало, що підхід до класифікації з використанням питомої енергії також виправданий. Підтверджено, що відношення W_0/m так само є критерієм подібності, записаним у розмірному вигляді. Для питомої запасеної енергії у довільному режимі отримано аналітичний вираз, вигляд якого підтверджує гіпотезу про те, що воно також є критерієм подібності. Досліджено характер впливу різних факторів на газодинаміку вибуху. Для окремих випадків встановлено параметри, вплив яких на амплітуду хвилі тиску найбільш істотний.

Застосування розглянутих підходів до передбачення газодинамічних характеристик вибуху має обмежений характер. Результати показали, що це можливо в окремих випадках, коли з фіксацією всіх інших параметрів змінюється якийсь один. Загалом припускаємо, що істотний вплив на газодинамічні характеристики вибуху може позначитися на тих параметрах, зміна яких значним чином змінює електричні характеристики.

Отримані результати можуть бути використані у подальших розробленнях із дистанційного розмінування у підрозділах оперативного призначення Національної гвардії України в умовах виконання бойових завдань.

Перелік джерел посилання

1. Баранов М. І. Розрахункова оцінка основних фізико-технічних характеристик плазми у локальній зоні повітряного електричного вибуху металевого провідника під впливом великого імпульсного струму. *Вісник Національного технічного університету «ХПИ»*. Харків, 2017. № 38 (1260). С. 5–9.

2. Баранов М. І. Наближений розрахунок активного опору плазмового каналу іскрового розряду у високовольтному сильноточному повітряному комутаторі атмосферного тиску. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Техніка та електрофізика високих напруг*. Харків, 2017. № 15 (1237). С. 5–11.

3. Хайнацький С. А. До питання класифікації електричного вибуху провідників у рідині. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Техніка та електрофізика високих напруг*. Харків, 2017. № 15 (1237). С. 92–97.

4. Бакларь В. Ю., Кускова Н. І., Челпанов Д. І. Фазові траєкторії вуглецю у процесі високоенергетичних режимів електровибуху графітового провідника. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Техніка та електрофізика високих напруг*. Харків, 2016. № 36 (1208). С. 5–9.

5. Баранов М. І. Спрощена математична модель електричного вибуху провідників під впливом великих імпульсних струмів. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Електротехніка і електромеханіка*. Харків, 2003. № 3. С. 59–64.

6. Хайнацький С. А. Дослідження оптимального режиму електричного вибуху провідників у воді та повітрі. *Електронна обробка матеріалів*. 2009. № 5. С. 57–64.

7. Baranov M. I., Koliushko G. M., Kravchenko V. I., Nedzel'skii O. S., and Dnyshchenko V. N. A current generator of the artificial lightning for full-scale tests of engineering objects. *Instruments and Experimental Techniques*. 2008. No. 3 (51). P. 401–405. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0020441208030123>.

8. Баранов М. І., Буряковський С. Г. Електротехнічне обладнання для генерування і вимірювання повного імпульсного струму штучної блискавки в умовах високовольтної електрофізичної лабораторії. *Електротехніка і електромеханіка*. 2024. № 3. С. 55–65. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2024.3.08>.

9. Khainatskiy, S. A. Investigations on optimal mode of electric explosion of conductors in water and air. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2009. Vol. 45. No 5. P. 397–403.

10. Кривицький Є. В. Динаміка електровибуху в рідині. Київ : Наукова думка, 1986. 206 с.

11. Кривицький Є. В. Хайнацький С. А. Про механізм електричного вибуху провідників. *Технічна електродинаміка*. 1982. № 4. С. 22–28.

12. Хайнацький С. А. Дослідження залежності опору провідника, що вибухає, від

«інтеграла дії» в різних моделях електровибуху. *Фізичні основи електричного вибуху*. Київ : Наукова думка, 1983. С. 65–73.

13. Федорович О. А., Войтенко Л. М. Про коефіцієнти розпаду неідеальної плазми імпульсних розрядів у воді при концентраціях електронів $2 \cdot 10^{20} \geq n_e \geq 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. *Питання атомної науки і техніки. Плазменна електроніка і нові методи прискорення*. 2008. № 4. (6). С. 288–293.

14. Федорович О. А., Войтенко Л. М. Експериментальні дослідження коефіцієнта розпаду неідеальної плазми імпульсних розрядів у воді. *Український фізичний журнал*. 2008. № 5. С. 451–457.

15. Бескаравайний Н. М., Поздєєв В. А. Хвильові задачі щодо розширення порожнини в рідині з урахуванням кінечності переміщення меж. *Фізико-хімічні процеси при високовольтному розряді рідини*. Київ : Наукова думка, 1980. С. 88–97.

16. Царенко П. І., Ризун А. Р., Жирнов М. В., Іванов В. В. Гідродинаміка і теплофізичні характеристики потужних підводних іскрових розрядів. Київ : Наукова думка, 1984. 148 с.

References

1. Baranov M. I. (2017). *Rozrakhunkova otsinka osnovnykh fizyko-tekhnichnykh harakterystyk plazmy v lokalnii zoni povitrianoho elektrychnoho vybukhu metalivoho provodnika pid vplyvom velykoho impulsnoho strumu* [Estimated evaluation of the main physical and technical characteristics of plasma in the local zone of air electric explosion of a metallic conductor under a large pulsed current]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu "KhPI"*. Kharkiv, vol. 38 (1260), pp. 5–9 [in Ukrainian].

2. Baranov M. I. (2017). *Pryblyznyi rozrakhunok aktyvnoho oporu plazmennoho kanala iskrovoho rozriada u vysokovoltnomu sylnotochnomu povitrianom kommutatori atmosfernoho tysku* [Approximate calculation of the active resistance of the plasma channel of a spark discharge in a high-voltage high-current air switch at atmospheric pressure]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu "KhPI". Seriya: tekhnika ta elektrofizyka vysokikh napruh*. Kharkiv, vol. 15 (1237), pp. 5–11 [in Ukrainian].

3. Khainatskiy S. A. (2017). *Do pytannia pro klasyfikatsiiu elektrychnoho vybukhu providnykiv u ridyni* [On the classification of electrical explosion of conductors in liquid]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu "KhPI". Seriya:*

tehnika ta elektrofizyka vysokokh napruh. Kharkiv, vol. 15 (1237), pp. 92–97 [in Ukrainian].

4. Baklar V. Yu., Kuskova N. I., Chelpanov D. I. (2016). *Fazovi traektorii vuhletsiu u protsesi vysokoenerhetychnykh rezhymiv elektrovybukhu hrafitovoho providnyka* [Phase trajectories of carbon in the process of high-energy modes of electric explosion of a graphite conductor]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu "KhPI". Seriya: tekhnika ta elektrofizyka vysokokh napruh*. Kharkiv, vol. 36 (1208), pp. 5–9 [in Ukrainian].

5. Baranov M. I. (2003). *Sproshchena matematychna model elektrychnoho vybukhu providnykiv pid vplyvom velykykh impulsnykh strumiv* [Simplified mathematical model of the electric explosion of conductors under the influence of large pulsed currents]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu "KhPI". Seriya: elektrotehnika i elektromekhanika*. Kharkiv, vol. 3, pp. 59–64 [in Ukrainian].

6. Khainatskyi S. A. (2009). *Doslidzhennia optimalnoho rezhymu elektrychnoho vybukhu providnykiv u vodi i povitri* [Studies of the optimal mode of electric explosion of conductors in water and air]. *Elektronna obrobka materialiv*, no. 5, pp. 57–64 [in Ukrainian].

7. Baranov, M. I., Koliushko, G. M., Kravchenko, V. I., Nedzel'skii, O. S., & Dnyshchenko, V. N. (2008). A current generator of the artificial lightning for full-scale tests of engineering objects. *Instruments and Experimental Techniques*, no. 3 (51), pp. 401–405. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0020441208030123> [in English].

8. Baranov M. I., Buriakovskiy S. H. (2024). *Elektrotekhnichne obladnannia dlia heneruvannia i vymiriuvannia povnoho impulsnoho strumu shtuchoi blyskavky v umovah vysokovoltnoi elektrofizychnoi laboratorii* [Electrical engineering equipment for generating and measuring of complete pulse current of artificial lightning in the conditions of high-voltage electrophysics laboratory]. *Elektrotehnika i elektromekhanika*, no. 3, pp. 55–65. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2024.3.08> [in Ukrainian].

9. Khainatskiy, S. A. (2009). Investigations on optimal mode of electric explosion of conductors in water and air. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, no. 45 (5), pp. 397–403 [in English].

10. Kryvytskyi Ye. V. (1986). *Dynamika elektrovybukhu v ridyni* [Dynamics of electric explosion in liquid]. Kyiv : Naukova dumka [in Ukrainian].

11. Kryvytskyi Ye. V., Khainatskyi S. A. (1982). *Pro mekhanizm elektrychnoho vybukhu providnykiv* [On the mechanism of electric explosion of conductors]. *Tekhnichna elektrodynamika*, no. 4, pp. 22–28 [in Ukrainian].

12. Khainatskyi S. A. (1983). *Doslidzhennia zalezhnosti oporu providnyka, shcho vybukhaie, vid "intehrala dii" v riznykh modeliakh elektrovybukhu*. [Investigation of the dependence of the resistance of an exploding conductor on the "action integral" in various models of electric explosion]. *Fizychni osnovy elektrychnoho vybukhu*. Kyiv : Naukova dumka, pp. 65–73 [in Ukrainian].

13. Fedorovych O. A., Voitenko L. M. (2008). *Pro koeffitsiienty rozpadu neidealnoi plazmy impulsnykh rozriadiv u vodi pry kontsentratsiakh elektroniv $2 \times 10^{20} \geq Ne \geq 2 \times 10^{17} \text{ sm}^{-3}$* [On the decay coefficients of non-ideal plasma of pulsed discharges in water at electron concentrations $2 \times 10^{20} \geq Ne \geq 2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$]. *Pytannia atomnoi nauky i tekhniky. Seriya: plazmenna elektronika i novi metody pryskorennia*, no. 4, pp. 288–293 [in Ukrainian].

14. Fedorovych O. A., Voitenko L. M. (2008). *Eksperymentalni doslidzhennia koefitsiienta rozpadu neidealnoi plazmy impulsnykh rozriadiv u vodi* [Experimental studies of the decay coefficient of non-ideal plasma of pulsed discharges in water]. *Ukrainskyi fizychnyi zhurnal*, no. 5, pp. 451–457 [in Ukrainian].

15. Beskaravainyi N. M., Pozdieiev V. A. (1980). *Khvylovi zadachi pro rozshyrennia porozhnyny v ridyni z urakhuvanniam kinechnosti peremishchennia mezh* [Wave problems on the expansion of a cavity in a liquid considering the finiteness of boundary displacements]. *Fizyko-mekhanichni protsessy pry vysokovoltnomu rozriadi u ridyni*. Kyiv : Naukova dumka, pp. 88–97 [in Ukrainian].

16. Tsarenko P. I., Rizun A. R., Zhyrnov M. V., Ivanov V. V. (1984). *Hidrodynamika i teplofizychni kharakterystyky potuzhnykh pidvodnykh iskrovykh rozriadiv* [Hydrodynamics and thermophysical characteristics of powerful underwater spark discharges]. Kyiv : Naukova dumka [in Ukrainian].

Стаття надійшла до редакції / Received: 17.09.2025

Прорецензовано / Revised: 30.09.2025

Схвалено до друку / Accepted: 06.10.2025

ABRAMOV SERHII

*Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Senior Researcher of the Research Laboratory for Training Troops,
Kyiv Institute of the National Guard of Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-0675-4850>*

TYTARENKO OLEKSII

*Doctor of Juridical Sciences, Associate Professor,
Head of the Research Laboratory for Training Troops,
Kyiv Institute of the National Guard of Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-3271-9402>*

USE OF DIMENSIONAL AND DIMENSIONALLESS COMPLEXES TO DESCRIBE AN EXPLOSION

The paper considers the development and verification of a system of dimensional and dimensionless complexes that adequately describe the physics of electrical conductor explosions (ECEs) in a wide range of modes, providing the possibility of predictive scaling and process control. In conditions where the source parameters (capacitance of the capacitor bank C , inductance of the discharge circuit L , initial voltage U_0) and conductor geometry can vary widely, the ECEs process acts as a flexible technical tool. The influence of the main parameters of the power source – capacitor bank capacity (C), discharge circuit inductance (L) and initial voltage (U_0) – as well as the geometry of the conductor on the kinetics of energy transformations during ECEs is considered. It is shown that changing these parameters allows varying the rate of energy release, the temporal evolution of current and voltage, the temperature and volume of plasma, which directly determines the intensity of mechanical (shock wave, pressure) and electro-optical (luminescence, radiation spectrum) effects. For each group, the physical content, limits of applicability, and its effect on the peak excess pressure, duration of the positive phase, impulse, as well as the radiation characteristics and dimensional-energy distribution of particles in the case of nanomaterial synthesis are determined. The methodology combines analytical calculations, scaled experimental studies of discharge series with variations in C , L , U_0 , conductor geometry, and medium properties. The expected results are universal empirical and semi-automated correlations that will allow controlling the characteristics of the ECEs for specific applications: a pulsed light source with a controlled spectrum and duration, a controlled shock wave generator for research and industrial needs, and adaptive pulse current interrupters. The results obtained can be used to develop pulsed light sources with a controlled spectrum, shock wave generators and adaptive switching systems in high-voltage technology, as well as in the development of a device for detecting and clearing mines on water logistics routes for operational units of the National Guard of Ukraine in the conditions of performing combat missions.

Keywords: explosion; parameter; installation; current; impact; conductor.