

Д-р техн. наук А. В. Єршов, д-р фіз.-мат. наук С. В. Лоскутов, С. В. Сейдаметов,
канд. техн. наук І. М. Коцур, д-р техн. наук Г. І. Камель

Запорізький національний технічний університет

ЕНЕРГЕТИЧНІ ТА ДИНАМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕЛЕКТРИЧНОГО ВИБУХУ ПРОВІДНИКА У РІДИНІ

Розроблено метод розрахунку температури, тиску пари у стовпі розряду та тиску ударної хвилі при вибуху металевого провідника у рідині. Виконано співставлення розрахунків тиску ударної хвилі у рідині з експериментом.

Ключові слова: електричний вибух провідників, плазма, ударна хвиля, гідродинамічний тиск.

Електричний вибух провідників (ЕВП) у рідині створює ударну хвилю високого тиску, який може становити кілька десятків тисяч атмосфер [1–3]. Завдяки цьому це явище може бути застосованим для процесів обробки металу, отримання мікро- та нанодисперсних порошків. При цьому залишаються недостатньо вивченими процеси перетворення енергії при ЕВП, що ускладнює виконання розрахунків для оптимізації процесу.

Зокрема, у проведених нами експериментах нез'ясованим залишається той факт, що тиск ударної хвилі дуже слабо залежить від енергії, яка вводиться в провідник під час вибуху. Наприклад, при збільшенні напруги на обкладинках конденсатора з 2 до 8 кВ енергія ЕВП зростала в 16 разів, у той час як тиск ударної хвилі збільшувався лише на 7 %, з 157 до 167 МПа.

В роботі [1] показана наявність двох стадій процесу, які відрізняються характером зміни струму і напруги. Перша стадія відповідає нагріванню провідника до температури кипіння при порівняно повільній зміні струму і напруги. У другій стадії відбувається вибухоподібний перехід провідника у пароплазмовий стан при різкому зростанні напруги та зменшенні струму. Тривалість цього процесу складає 0,5 мкс, що приблизно на порядок менше тривалості нагрівання провідника до кипіння. Особливістю стадії вибуху провідника є не тільки підвищення тиску, але і зміщення кордону пароплазмової області на 0,5 мм щодо початкового положення до вибуху.

Тиск ударної хвилі визначається енерговиділенням в обсязі провідника під час вибуху. Однак визначення параметрів процесу нагрівання являє собою складну задачу, пов'язану з різкою зміною електропровідності металу при ЕВП.

Метою роботи є розробка моделі нагрівання матеріалу провідника в твердому, рідкому і газоподібному станах при ЕВП і визначення тиску ударної хвилі, яка утворюється при вибуху провідника.

Модель нагрівання провідника при розрядженні конденсатора

Процес нагріву провідника при ЕВП включає в себе дві стадії: 1) нагрівання провідника в твердому і рідкому станах; 2) нагрівання провідника в газоподібному стані, який збігається з моментом вибуху. Перша стадія нагрівання відбувається при зростанні струму в розрядному контурі до моменту закипання провідника.

Рівняння теплового балансу при нагріванні провідника розрядним струмом $I = I_m \sin \omega t$ на опорі R з урахуванням лінійної залежності опору від температури $R = R_0 \alpha t$ дає залежність температури T від часу t

$$\nu C_m \alpha T = R_0 \alpha I_m^2 \sin^2 \omega t d\tau, \quad (1)$$

де ν – кількість молей матеріалу провідника; C_m – мольна теплоємність провідника; T – температура провідника; α – температурний коефіцієнт опору провідника; I_m – амплітуда струму в контурі; $\omega = 2\pi/T_k$ – циклічна частота коливань контуру з періодом коливань T_k ; τ – час нагрівання провідника від початкової температури T_0 до температури кипіння T_k .

Оцінки показують, що вибух провідника відбувається при струмі значно меншому, ніж амплітудний струм контуру. При цьому можна спростити рішення, якщо використовувати розкладання функції синуса в ряд і обмежитися першим членом розкладання, вважаючи, що

$$I \approx I_m \omega t. \quad (2)$$

Інтегруючи (1) з урахуванням (2), знаходимо час нагрівання провідника від початкової температури T_0 до температури кипіння T_k у вигляді

$$\tau = 3 \sqrt{\frac{3\nu C_m \ln \frac{T_k}{T_0}}{I_m^2 \omega^2 \alpha R_0}}. \quad (3)$$

Розрахунок часу нагрівання дає величину струму в момент скипання провідника з (2)

$$I_k = \sqrt[3]{\frac{3\nu C_m I_m \omega}{\alpha R_0} \ln \frac{T_k}{T_0}} \quad (4)$$

Розрахунок I_k при мінімальному амплітудному струмі $I_m = 5 \cdot 10^4$ А, який відповідав мінімальній напрузі конденсатора $U = 2$ кВ, дає значення струму кипіння $I_k = 2,58 \cdot 10^4$ А. Отже, виконується умова $I_k < I_m$ і наближення (2) обґрунтовано. При зростанні I_m величина I_k згідно з (4), зростає повільніше, ніж I_m , оскільки $I_k \sim I_m^{1/3}$. При цьому наближення (2) стає більш точним. При закипанні провідника відбувається різке зростання опору струмопровідного каналу. Енергія, яка виділяється розрядним струмом, дорівнює енергії електромагнітного поля, приводить до зростання температури і тиску в пароплазмовій області та утворення фронту ударної хвилі. Таким чином, температура пароплазмового каналу в кінці розряду визначається виразом

$$T_n = T_k + \frac{LI_k^2}{2\nu C_n} \quad (5)$$

де L – індуктивність контуру, $L = 6,2 \cdot 10^{-7}$ Гн; C_n – молярна теплоємність парів міді; $T_k = 3000$ К – температура кипіння провідника з міді.

Оцінимо зміну опору провідника при переході у стан плазми. Враховуючи, що провідність плазми при розглянутих умовах складає $2 \cdot 10^4$ Ом⁻¹м⁻¹, з [4], знаходимо опір плазмового стовпа на початку вибуху, який складе величину $R_{nl} = 2,63$ Ом. Тоді час релаксації струму розряду можна знайти з формули перехідного процесу

$$\tau_p = \frac{L}{R} = 2,35 \cdot 10^{-7} \text{ с.} \quad (6)$$

За цей час радіус плазмового стовпа, який розширюється зі швидкістю $a \approx 1,93 \cdot 10^3$ м/с, збільшиться на величину $\Delta r = a \cdot \tau = 4,54 \cdot 10^{-4}$ м. Тиск пари в стовпі розряду визначається за формулою

$$P_0 = \frac{\rho_0 R T_n}{\mu \left(1 + \frac{\Delta r}{r_0}\right)^2} \quad (7)$$

де ρ_0 – густина провідника; μ – молярна маса мідного провідника.

Тиск ударної хвилі, який вимірюється датчиком, розташованим на відстані l від провідника, визначиться за формулою [1]

$$P_p = (K \cdot P_0)^{0,5} (r_0 + \Delta r) / l \quad (8)$$

де $K = 2,6 \cdot 10^9$ Па – об'ємний модуль пружності води.

Результати розрахунку наведені в таблиці та графічно представлені на рис. 1–5.

Тиск P_0 в зоні вибуху ЕВП задовільно узгоджується з експериментальними результатами роботи [5]. Під час вибуху провідника різко зростає падіння напруги внаслідок підвищення опору пароплазмового каналу порівняно з опором металу

$$U_n = I_k \cdot R_{nl} \quad (9)$$

Таблиця 1 – Параметри процесу нагріву мідного провідника при електричному вибуху у воді

U , кВ	2	4	6	8	10
I_m , кА	50	100	150	200	250
I_k , кА	27,1	33	39,5	43	46,5
T_n , 10 ³ К	20,3	30,6	39,0	47	54
P_0 , 10 ⁹ Па	4,25	6,35	8,15	9,85	11,2
P_p , 10 ⁸ Па	1,32	1,62	1,80	1,99	2,16
$P_{\text{з}}$, 10 ⁸ Па	1,571	1,662	–	1,67	–
U_n , кВ	71,2	86,2	103	113	122

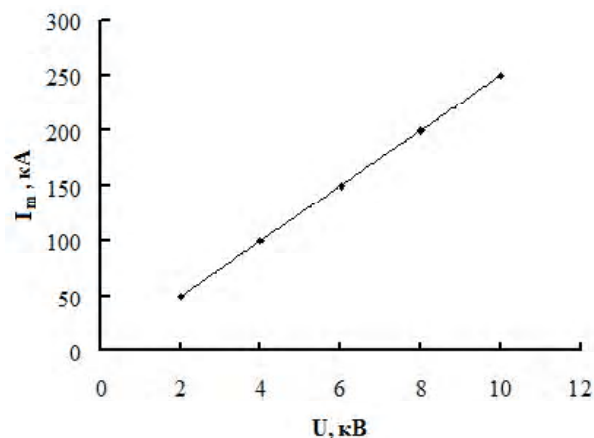


Рис. 1. Залежність амплітуди незатухаючих коливань струму I_m в контурі від напруги U на обкладинках батареї конденсаторів

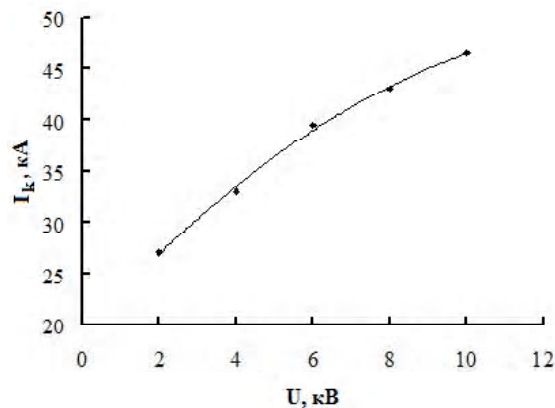


Рис. 2. Залежність струму кипіння I_k від напруги U на обкладинках батареї конденсаторів

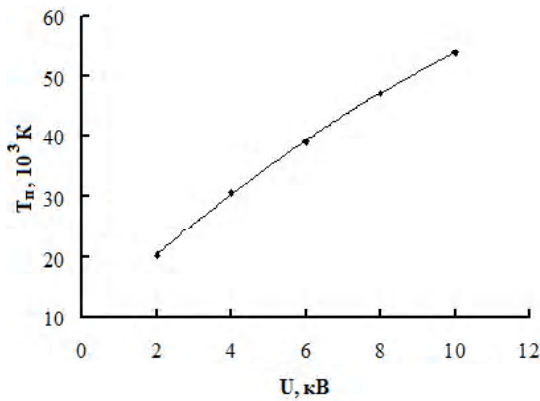


Рис. 3. Залежність температури плазми T_n від напруги U на обкладинках батареї конденсаторів

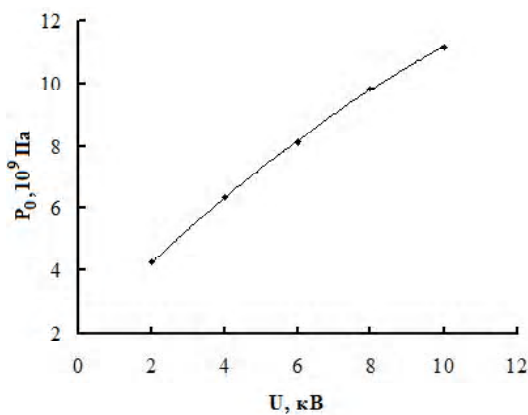


Рис. 4. Тиск пари P_0 в стовпі розряду в залежності від напруги U на обкладинках батареї конденсаторів

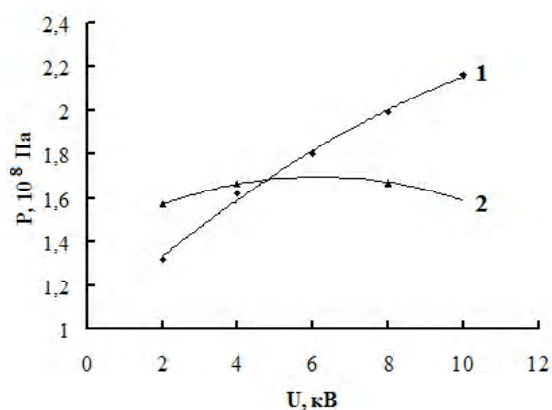


Рис. 5. Залежність тиску P ударної хвилі від напруги U на обкладинках батареї конденсаторів:
1 – розрахункова крива; 2 – експериментальна крива

Це падіння напруги долається ЕРС самоіндукції контуру. Розрахунок значень U_n в залежності від напруги на обкладинках конденсатора наведений в таблиці. З підвищенням струму розряду і напруги на обкладинках конденсатора напруга на стовпі дуги може досягати 10² кВ. При цьому можливі шунтуючі пробої в зовнішньому колі, які призводять до втрати енергії вибуху. Порівняння розрахункового значення тиску ударної хвилі P_p з експериментальним P_e показує істотне розходження, коли пікова напруга при вибуху перевершує 86 кВ. Така напруга пробиває зазори довжиною 3 см, що, можливо, і відбувалося при експериментах.

Енергія вибуху провідника визначається не запасом енергії конденсатора, а енергією електромагнітного поля в момент, попередній вибуху. Напруга на провіднику, який вибухає, в момент вибуху перевищує напругу конденсатора в 40÷60 разів за рахунок виникнення ЕРС самоіндукції.

Висновки

1. Розрахунками визначена температура і тиск металеві плазми, яка утворюється, в залежності від напруги розрядного конденсатора. Виконано зіставлення результатів розрахунків і вимірів тиску на фронті ударної хвилі.

2. Показано, що тиск і температура ударної хвилі зростають не пропорційно енергії зарядженого конденсатора, тому що енергія вибуху визначається енергією електромагнітного, а не електростатичного поля під час вибуху.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Кортхонджия В.П. О природе импульсного давления, создаваемого взрывом проволоки в воде / В. П. Кортхонджия, М. О. Мдивнишвили, Э. К. Саралидзе // ЖТФ. – 2006. – Т. 76. – Вып. 11. – С. 43–46.
2. Особенности электрического взрыва проводников в жидкости / [И. С. Гасанов, Э. К. Гусейнов, В. М. Салманов, А. А. Агава] // Проблемы энергетики. – 2003. – № 5. – С. 6–8.
3. Григорьев А. Н. Давление при электрическом взрыве металлических фольг / А. Н. Григорьев, А. В. Павленко // Письма в ЖТФ. – 2009. – Т. 35. – № 18. – С. 65–72.
4. Котов Ю. А. Характеристики порошков оксида алюминия, полученных импульсным нагревом проволоки / Ю. А. Котов, О. М. Саматов // Поверхность. – 1994. – № 10–14. – С. 90–94.
5. Седой В. С. Получение высокодисперсных металлических порошков методом электрического взрыва в азоте пониженного давления / В. С. Седой, В. В. Валевиц // Письма в ЖТФ. – 1999. – Т. 25. Вып. 14. – С. 81–84.

Надійшла до редакції 25.01.2011

Ершов А.В., Лоскутов С.В., Сейдаметов С.В., Камель Г.И., Коцур И.М. Энергетические и динамические характеристики электрического взрыва проводника в жидкости

Разработан метод расчета температуры, давления пара в столбе разряда и давления ударной волны при взрыве металлического проводника в жидкости. Выполнено сопоставление расчетов давления ударной волны в жидкости с экспериментом.

Ключевые слова: электрический взрыв проводников, плазма, ударная волна, гидродинамическое давление.

Ershov A.V., Loskutov S.V., Seidametov S.V., Kamel, G.I., Kotsur I.M. Energy and dynamic characteristics of conductor electrical explosion in liquid

The authors propose the method of calculation of temperature and pressure in a discharge column and shock wave pressure at metal conductor explosion in liquid. The calculated shock wave in liquid is compared with the experimental data.

Key words: conductors electrical explosion, plasma, shock wave, hydrodynamic pressure.