

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  $\nu$  – кількість молей матеріалу провідника;  $C_m$  – мольна теплоємність провідника;  $T$  – температура провідника;  $\alpha$  – температурний коефіцієнт опору провідника;  $I_m$  – амплітуда струму в контурі;  $\omega = 2\pi/T_k$  – циклічна частота коливань контуру з періодом коливань  $T_k$ ;  $\tau$  – 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<sup>-1</sup>м<sup>-1</sup>, 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  $\rho_0$  – густина провідника;  $\mu$  – 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.

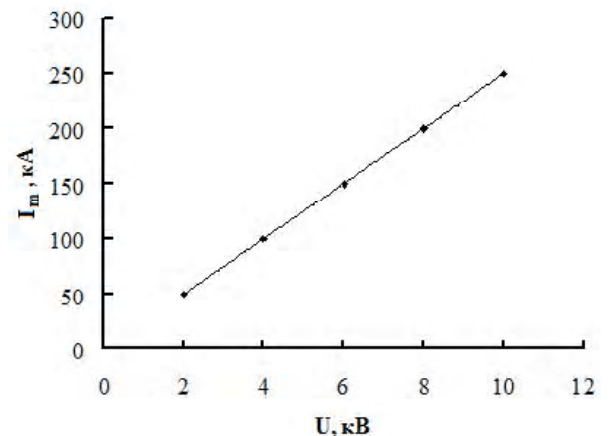
Результати розрахунку наведені в таблиці та графічно представлені на рис. 1–5.

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

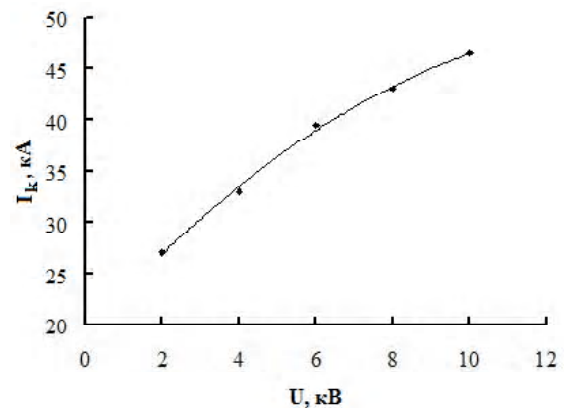
$$U_n = I_k \cdot R_{nl} \quad (9)$$

**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 <sup>3</sup> К	20,3	30,6	39,0	47	54
$P_0$ , 10 <sup>9</sup> Па	4,25	6,35	8,15	9,85	11,2
$P_p$ , 10 <sup>8</sup> Па	1,32	1,62	1,80	1,99	2,16
$P_{\text{з}}$ , 10 <sup>8</sup> 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

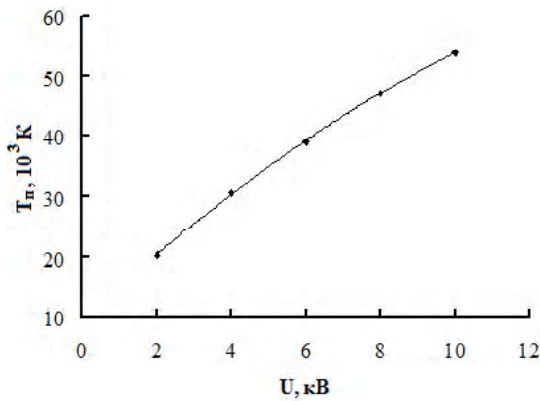


Рис. 3. Залежність температури плазми  $T_n$  від напруги  $U$  на обкладинках батареї конденсаторів

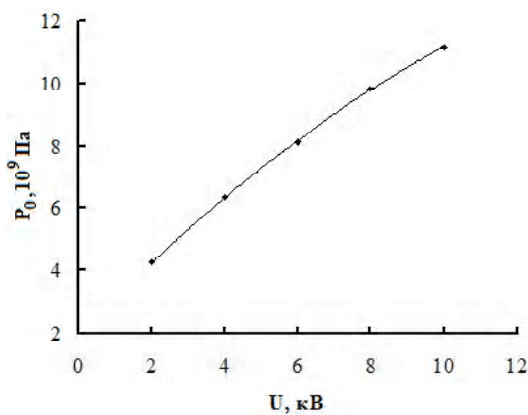


Рис. 4. Тиск пари  $P_0$  в стовпі розряду в залежності від напруги  $U$  на обкладинках батареї конденсаторів

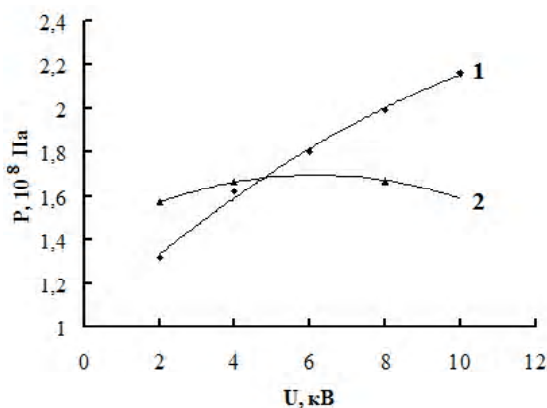


Рис. 5. Залежність тиску  $P$  ударної хвилі від напруги  $U$  на обкладинках батареї конденсаторів:  
1 – розрахункова крива; 2 – експериментальна крива

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 10<sup>2</sup> 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.