

ПРО ВПЛИВ ПРОЦЕСІВ ПЕРЕНЕСЕННЯ НА ФОРМУ, РОЗМІР ТА СТРУКТУРУ ПЛАЗМОВОГО КАНАЛУ ІМПУЛЬСНОГО РОЗРЯДУ У ВОДІ

**В. В. Гладковський^{1,2}, М.А. Бєлошенко², В. Г. Панченко², П. В. Порицький², Ю.В. Вірко²,
О. А. Федорович²**

¹- Національна академія наук України, Київ, Україна

²- Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

Застосування високовольтних імпульсних розрядів у воді передбачає широкий спектр галузей для застосування, від очищення води до матеріалознавства [1-10]. Зокрема, цей метод можна використати для ефективного знищення мікроорганізмів та органічних забруднювачів у воді, а також для модифікації властивостей матеріалів. Вивчення плазмових властивостей і динаміки ударних хвиль, які виникають у процесі такого електричного розряду, мають важливе значення для розуміння поведінки матеріалів в екстремальних умовах. Крім того, дослідження форми каналу є необхідним для визначення симетрії, в якій виконуються розрахунки тиску, а також важливо враховувати вплив нестійкостей плазмового каналу на його поперечні розміри.

У доповіді наведено результати досліджень форми, розмірів та структури плазмового каналу, що утворюється імпульсним розрядом у воді, ініційованим електричним вибухом металевого провідника (Рис.1,2). Встановлено, що плазмовий канал має циліндричну форму з невеликими потовщеннями поблизу електродів та демонструє значну неоднорідність на пізніх стадіях розвитку. Радіус каналу збільшується при зростанні введеної енергії, досягаючи максимальних значень на ранніх стадіях розряду, після чого спостерігається уповільнення розширення. На рис. 2 наведено типову фотореєстрацію розширення каналу, де можна спостерігати ударні хвилі, що утворюються під час вибуху провідника, а також після пробою парів металу при інтенсивному введенні енергії в канал. Виявлено також, що швидкість поширення ударних хвиль збільшується до 2000 м/с, а згодом експоненційно наближається до швидкості звуку у воді.

Показано, що плазмовий канал має циліндричну форму з двома невеликими куполоподібними потовщеннями поблизу електродів. Діаметри каналу значно різняться в різних перерізах при малих швидкостях наростання струму. Зі збільшенням швидкості введення енергії межа каналу вирівнюється. На пізній стадії розвитку плазмового каналу спостерігається його неоднорідність у поперечному напрямку. На місці вибухового провідника спостерігається яскраве світіння ядра, яке має поперечну упорядковану стратифікацію розміром ~0,5 мм. При збільшенні початкового діаметра ініціюючого розряду провідника, відмінність у яскравісній температурі сусідніх областей може досягати дворазового значення. Відмінність у яскравісній температурі сусідніх областей зменшується зі зменшенням діаметра розряду і зі збільшенням швидкості введення енергії.

При ініціюванні плазми провідником, що вибухає, та швидкому введенні енергії в канал після пробою парів металу, радіус каналу, що розширюється, має кілька характерних ділянок. Під час наростання струму в каналі спостерігається прискорене розширення каналу, швидкість якого досягає максимального значення, після чого відбувається уповільнення розширення. Це уповільнення пов'язане зі зменшенням швидкості введення енергії в канал. При припиненні введення енергії спостерігається поступове зменшення швидкості розширення каналу. Канал продовжує розширюватися за рахунок запасеної в плазмі кінетичної енергії. Для розрахунків тиску необхідний радіус фронту ударної хвилі. Використана методика дозволяла проводити одночасну зйомку радіусу фронту.

Отже, мають місце певні неоднорідності в плазмі при розширенні каналу. Проте незважаючи на можливість перегріву, промениста теплопровідність повинна вирівнювати температуру в поперечному перерізі каналу. Це явище, відоме як "просвітлення" щільної плазми [6], оскільки коефіцієнт променистої теплопровідності пропорційний довжині пробігу кванта та температурі:

$$\chi = \frac{16}{3} \sigma_0 T^3 \ell$$

де χ – коефіцієнт променистої теплопровідності, T – температура, $\sigma_0 = 5,67037 \times 10^{-8}$ Вт м⁻² К⁻⁴ - стала Стефана-Больцмана, ℓ – середня довжина пробігу квантів.

З іншого боку, невелика різниця у поперечних розмірах каналів у дослідженні свідчить про рівномірний розподіл тиску практично по всьому об'єму плазмового каналу. В іншому випадку спостерігалось б збільшення швидкості розширення окремих ділянок каналу, оскільки остання, разом з радіусом каналу, однозначно пов'язана із значенням тиску в каналі. Результати дослідження форми каналу

дозволили виконувати вимірювання його розмірів у певному поперечному перерізі.

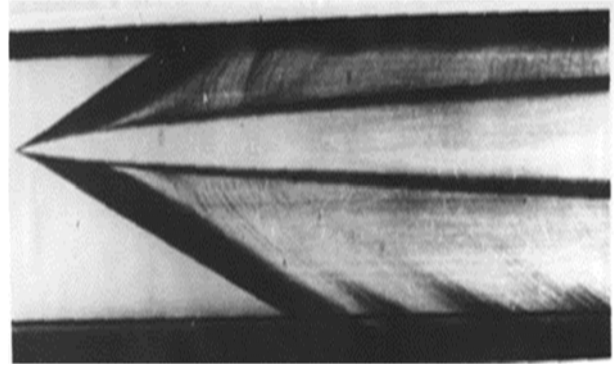
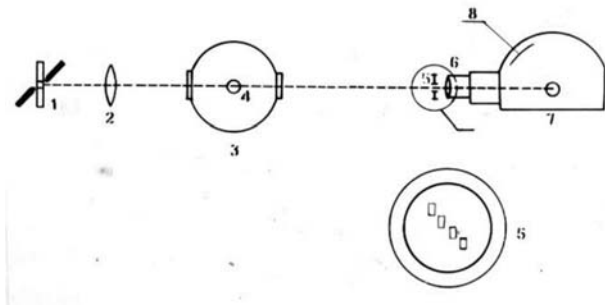


Рис. 1. Оптична схема для визначення форми плазмового каналу: 1 - еталонне джерело світла, 2 - об'єктив, 3 - експериментальна ємність, 4 - плазмовий канал, 5 - ступінчаста діафрагма, 6 - насадка з об'єктивом, 7 – камера спектрофотореєстратора (СФР), 8 - ступінчастий послаблювач.

Рис. 2. Фотореєстрограма розширення плазмового каналу протягом часу розгортки $t=40$ мкс. Діаметр ініціюючого провідника (W) $d=20$ мкм при напрузі $U=10$ кВ, довжині розряду $l=40$ мм, індуктивності розрядного контура $L=0,43$ мкГн.

Отримані результати важливі для розуміння фізичних процесів у плазмовому каналі та подальших розрахунків таких параметрів плазми, як тиск, температура та питома електропровідність.

1. P. Šunka. Phys. Plasmas 8 (2001) 2587.
2. B.R. Locke, S.M. Thagard. Plasma Chemistry and Plasma Processing 32 (2012) 875.
3. V.A. Zhovtyansky *et al.* IEEE Trans. Plasma Sci. 31 (2013) 3233.
4. H. Akiyama, M. Akiyama. IEEE Trans. Electrical and Electronic Engineering 16 (2021) 6.
5. Y. Chai *et al.* Energies 16 (2023) 4932.
6. O. A. Fedorovich Nucl. Phys. At. Energy. 2-24 (2008) 86.
7. P.V. Porytsky, P.D. Starchyk. Ukr. J. Phys. 8 (2016) 709.
8. O. A. Fedorovich *et al.* Nucl. Phys. At. Energy. 24 (2023) 351.
9. V.V. Hladkovskyi *et al.* Nucl. Phys. At. Energy. 25 (2024) 372.
10. V.V. Hladkovskyi *et al.* Probl. At. Sci. & Technol. Ser. Plasma Phys. 155 (2025) 103.