

УДК 543.8 + 541.13

## Експериментальне дослідження явища люмінесценції в електродинамічних процесах, що супроводжуються гідродинамічною кавітацією

Ночніченко<sup>1</sup> І.В., Костюк<sup>2</sup> Д.В., Кривошеєв<sup>2</sup> В.Є., Коваль О.Д.<sup>2</sup>

1- Ягеллонський університет, Краків, Польща

2- КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

*Питання фізики процесу формування гідродинамічної люмінесценції потребує ретельного дослідження. У науково-технічній літературі широко використовуються два терміни, що позначають світіння рідини: сонолюмінесценція і світловипромінювання. Перший термін безпосередньо пов'язаний з ультразвуком як причиною світіння рідини; другий - передбачає більш широкий спектр причин, що викликають світіння. Так чи інакше, обидва процеси мають дві основні теорії свого виникнення - «теплову» і «електричну». «Теплова» теорія передбачає, що при зовнішньому впливі на кавітаційну бульбашку всередині неї утворюються високі температури, які стимулюють випромінювання бульбашки. «Електрична» теорія базується на електричних явищах всередині самої бульбашки або взаємодії з сусідніми кавітаційними бульбашками.*

*Практичне значення результатів роботи визначається пошуком надійної теорії явища гідродинамічної люмінесценції. Отримані результати сприяють глибшому розумінню досліджуваних явищ і створюють основу для розробки експериментально обґрунтованої теорії походження явищ сонолюмінесценції та гідроломінесценції, що позитивно впливає на впровадження цих явищ у технологію. процеси.*

*Актуальність дослідження зумовлена також широким використанням діелектричних трубопроводів при подачі вуглеводневих та інших рідин до різних технічних пристроїв. У майбутньому можливе використання цих процесів у хімії, фармацевтичній промисловості, а також створення ефективних методів обробки поверхні рідини.*

*Ключові слова:* Кавітація; Сонолюмінесценція; Гідроломінесценція; Триболомінесценція; Візуалізація потоку рідини

У гідравлічному обладнанні в якості запірно-регулюючих елементів використовуються різні види дроселюючих елементів, в яких потік робочої рідини має турбулентний характер, а у вузькому перерізі висока швидкість викликає появу кавітації і пов'язане з нею активне виділення бульбашок нерозчиненого повітря та пари. У зоні підвищеного тиску бульбашки миттєво руйнуються, що викликає ерозивне руйнування матеріалу стінок каналу та активні акустичні процеси. Швидке закриття парогазових каверн за законами термодинаміки може викликати локальне підвищення температури, а за певних умов і світіння рідини. З огляду на вищезазначене викликає інтерес дослідження питання фізики процесу формування гідродинамічної люмінесценції. [1].

У науково-технічній літературі широко використовуються два терміни, що позначають світіння рідини: сонолюмінесценція і світловипромінювання. Перший термін безпосередньо пов'язаний з ультразвуком як причиною світіння рідини; другий – передбачає більш широкий спектр причин, що викликають світіння. Так чи інакше, обидва процеси мають дві основні теорії свого виникнення – теплову та електричну [2].

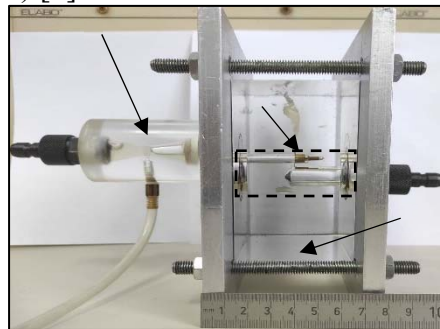
Теплова теорія передбачає, що при впливі на кавітаційну бульбашку всередині неї утворюються високі температури, що стимулює випромінювання світла з бульбашки. Теплову теорію гідродинамічної люмінесценції запропонував Колдамасов [3], у своїй статті вказавши, що джерелом люмінесценції є плазмовий згусток, що утворюється при середній температурі. 10<sup>4</sup> К. Прихильниками теплової теорії гідродинамічної люмінесценції є Гордєєв і Сербінов

[4, 5]. У серії експериментів по дослідженню збудження вибуху в рідких ВР в [5] встановлено, що ініціювання вибуху кавітацією відбувається не при розширенні, а під час закриття кавітаційної порожнини у ВР. На основі отриманих результатів автори [4, 5] дійшли висновку, що причиною випромінювання світла при гідродинамічній люмінесценції є теплові процеси, які відбуваються під час кавітації.

Електрична теорія базується на електричних явищах всередині самої бульбашки або взаємодії з сусідніми кавітаційними бульбашками. Відповідність безперервного спектра, що спостерігається при солюмінесценції, спектру випромінювання чорного тіла відіграють певну роль як обґрунтування цієї теорії.

Також [6] світлове випромінювання пов'язували з електричними розрядами в рідині. Електричні ефекти, які супроводжують течію рідини при високому тиску, безпосередньо спостерігалися в [7, 8], в [3] подібний висновок зроблено в результаті непрямих вимірювань. Взагалі зв'язок кавітації з електричними розрядами може бути важливою для розуміння фізичної природи пробою рідких діелектриків.

Для проведення експериментальних досліджень була виготовлена модель гідродинамічного кавітатора з насадкою у вигляді прозорого циліндра з оргскла, рис. 1. Проточна частина кавітатора містить на вході ежектор, який дозволяє вводити повітря або іншу фазу, в потік рідини у відповідній концентрації. Основна частина кавітатора складається з регульованого каналу у вигляді дроселя змінного перетину (активна площа проходу встановлюється поворотом гвинта) [2].



**Рис. 1. Гідродинамічний кавітатор з циліндричним соплом та ежектором на вході (1 – кавітатор, 2 – ежектор, 3 – корпус)**

Для дослідження фізичних процесів, що відбуваються всередині кавітатора, було вирішено модернізувати наявне сопло, додавши лакований мідний дріт, до якого можна підключити осцилограф та цифровий мультиметр (рис.2). Існуючий стенд та обладнання було заземлено, щоб уникнути шуму. Біля гвинта в зоні, де виникає явище гідродинамічного світіння з дроту була знята ізоляція.

При пропусканні через кавітатор потоку масла під тиском до 1 МПа видимих змін не відбувається і рідина залишається прозорою. Після підвищення тиску перед кавітатором до 1,5 МПа безпосередньо біля входу в наскрізний отвір утворюється досить тонкий шар мікробульбашок, локалізованих на внутрішній поверхні проходної секції (приєднана кавітація). При підвищенні тиску перед кавітатором до 2 МПа безпосередньо біля входу всередину проходного отвору відзначаються короточасні (тривалістю 1–2 с) спалахи синьо-фіолетового світіння гідролюмінесценції. На виході з отвору розвивається факел кавітаційних бульбашок, який поступово заповнює всю вихідну камеру, але ця частина кавітаційних бульбашок ніколи не ініціювала гідролюмінесценцію. З підвищенням тиску до 2,5 МПа частота спалахів гідролюмінесценції зростає, і при досягненні тиску 3...3,5 МПа світіння гідролюмінесценції стає безперервним, стійким, а подальше підвищення тиску лише незначно збільшує його інтенсивність.

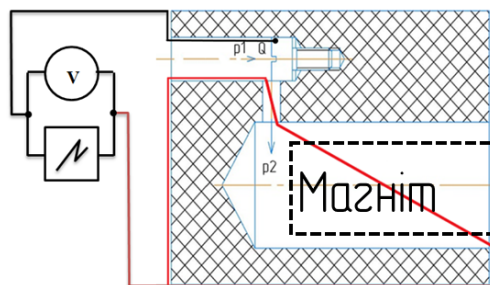


Рис. 2. Дослідна схема гідродинамічного кавітатора (червоним показано електричний дріт для визначення електричного потенціалу в області виникнення кавітації)

Спостерігаючи за процесом у сповільненій зйомці (зображення, отримані під час високошвидкісної відеозйомки), можна побачити, що гідролюмінесценція не є безперервним світлом, а виникає з певною частотою частими, несинхронізованими, випадковими спалахами (рис.3). Після досягнення тиску 3 МПа відбувається поступове зближення приєднаної кавітації (у звуженні) з факелом кавітаційних бульбашок у вихідній частині кавітатора, а приєднана кавітація і факел бульбашок просторово розташовуються, розділені. При встановленні режиму суперкавітації, коли факел кавітаційних бульбашок заповнює всю вихідну площу дросельного пристрою і замикається з зоною приєднаної кавітації, на осцилограмі були помічені аномальні «шуми». При поступовому зниженні тиску до 2 МПа в лівій вхідній камері кавітатора інтенсивність світіння поступово зменшується, але залишається стабільною навіть при тисках, при яких на початку роботи виникали дуже рідкі спалахи світіння. Так, при дослідженні гідролюмінесценції виявляється гістерезис процесу світлових спалахів.

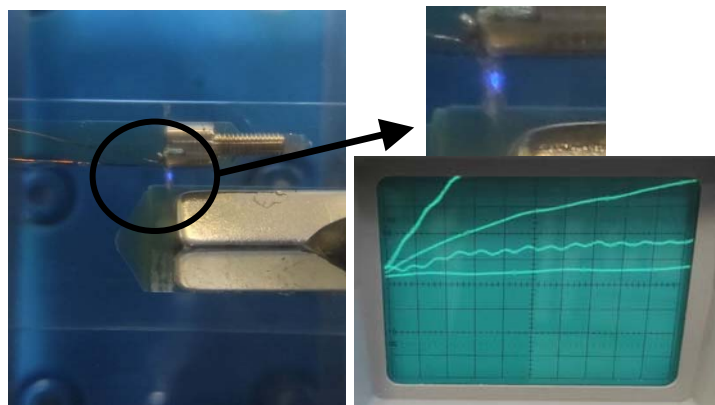


Рис. 3. Спостереження гідролюмінесценції в кавітаторі та поява електричних пульсації під час появи світіння

Таким чином, можна було припустити, що явище гідролюмінесценції за певних умов має електричний характер. Огляд досліджень показав, що випромінювання світла залежить від реологічних властивостей рідини. Він більш інтенсивний там, де в'язкість нижча. Отримані експериментальні дані були апроксимовані для можливості використання математичної моделі гідродинамічного кавітаційного генератора та дозволили врахувати властивості робочого тіла.

На підставі виконаної роботи можна зробити висновок, що причиною гідродинамічного світіння є тертя рідини об стінки каналу та світлове випромінювання подвійних електричних шарів. Отже, причиною виникнення гідродинамічної люмінесценції є локальне підвищення

напруженості електричного поля, яке виникає при порушенні електронейтральності всередині каверни.

Розроблений авторами стенд дозволив перевірити теорію залежності світлового випромінювання від реологічних властивостей рідини. Запропонована оригінальна конструкція дозволила дослідити зміну електричних параметрів потоку при виникненні люмінесценції, а саме підвищення напруги та появу пульсацій в режимі суперкавітації. Виявлено гістерезис процесу появи світлового випромінювання.

#### Список літератури

1. Кривошеев, В. Є. Експериментальне дослідження гідродинамічної кавітації, що супроводжується явищем люмінесценції : магістерська дис. : 131 Прикладна механіка / Кривошеев Владислав Євгенійович. – Київ, 2020. – 110 с.
2. Experimental study of cavitation-hydrodynamic luminescence in gas-liquid environment / I. Nochnichenko [et al.] // Bulletin of the National Technical University "KhPI". Ser. : Hy-draulic machines and hydraulic units : zb. nauk. pr. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2021. – # 1. – S. 32-39.
3. Farhat M, Chakravarty A, Field J E., Luminescence from hydrodynamic cavitation. Proc R Soc A, 2011, 467: 591–606. doi: 10.1098/rspa.2010.0134.
4. Eberlein C. Theory of quantum radiation observed as sonoluminescence. Physical Review A. 1996. Vol. 53, iss. 4. P. 2772–2787. doi: 10.1103/PhysRevA.53.2772
5. Milton K. A. Dimensional and Dynamical Aspects of the Casimir Effect: Understanding the Reality and Significance of Vacuum Energy. URL: <https://arxiv.org/abs/hep-th/0009173> (accessed: 12.04.2021).
6. Герценштейн С. Я., Монахов А. А. Электризация и свечение жидкости в коаксиальном канале с диэлектрическими стенками. Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 2009. № 3. С. 114–119.
7. Leighton T. G., Farhat M., Field J. E., Avellan F. Cavitation luminescence from flow over a hydrofoil in a cavitation tunnel. Journal of Fluid Mechanics. 2003. Vol. 480. P. 43–60. doi: 10.1017/S0022112003003732
8. Константинов В. А. ДАН СССР. 1947, Т. 56, № 3. С. 259–260.

## Experimental study of the phenomenon of luminescence in electrodynamic processes accompanied by hydrodynamic cavitation

Nochnichenko Ihor, Kostiuk Dmytro, Kryvosheiev Vladyslav, Koval Oleksii

*The issue of the physics process of hydrodynamic luminescence formation requires careful research. In scientific and technical literature, two terms denoting the glow of a liquid are widely used: sonoluminescence and light emission. The first term is directly related to ultrasound as the cause the liquid to glow; the second - provides a wider range of reasons that cause the glow. One way or another, both processes have two main theories of their occurrence - "thermal" and "electric". The "thermal" theory assumes that when an external influence is applied to a cavitating bubble, high temperatures are formed inside it, which stimulate the emission of radiation by the bubble. The "electrical" theory is based on electrical phenomena inside the bubble itself or interaction with nearby cavitating bubbles.*

*The practical value of the work results is determined by the search for a reliable theory of the phenomenon of hydrodynamic luminescence. The obtained results contribute to a deeper understanding of the studied phenomena and create a basis for the development of an experimentally based theory of the origin of the phenomena of sonoluminescence and hydroluminescence, which has a positive effect on the introduction of these phenomena into technological processes.*

*The relevance of the study is also due to the wide use of dielectric pipelines when supplying hydrocarbon and other liquids to various technical devices. In the future, it is possible to use these processes in the chemistry, pharmaceutical industry, and the creation of effective methods of surface treatment with liquids.*

***Keywords:** Cavitation; Sonoluminescence; Hydroluminescence; Triboluminescence; Visualization of liquid flow*