

УДК 534.222.2

Н. Манічева

Інженер

Ю. Дудзінський

Д-р фіз.-мат. наук

В. Вітков

Інженер

Одеський національний
політехнічний університет,
м. Одеса

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ КАВІТАЦІЇ У ДВЧАСТОТНОМУ УЛЬТРАЗВУКОВОМУ ПОЛІ

Досліджено генерування світла в рідині під дією ультразвуку (звукolumінісценція) у полі високочастотного випромінювача при одночасному або попередньому впливі на рідину низькочастотним звуком. Показано, що істотне посилення звукolumінісценції відбувається не тільки при одночасній роботі випромінювачів, але й протягом тривалого проміжку часу після вимкнення низькочастотного сигналу. Виявлено ефект тривалої післядії низькочастотних ультразвукових коливань на інтенсивність звукolumінісценції, що генерується під дією високочастотних коливань. Розглянуто можливі механізми виявлених закономірностей.

кавітація, звукolumінісценція, низькочастотне й високочастотне поле

Відомо, що ефективність концентрації енергії одиночним кавітаційним пухирцем значно вища, ніж у складі кавітаційної області з багатьма пухирцями [1 — 3]. Це, зокрема, виражається в більшій інтенсивності спалахів звукolumінісценції (ЗЛ), а також у більших температурах і тисках, що досягаються при колапсі пухирця. Наприклад, в умовах звукolumінісценції від одного пухирця кількість фотонів у кожному спалаху досягає 10^5 — 10^6 [1], у той час, як кількість фотонів у спалаху за умов звукolumінісценції від багатьох пухирців їх кількість не перевищує 10^2 [4, 5]. Оцінки температури, до якої розігрівається парогозова суміш вередині пухирця, дають значення 2000 — 6000 К для багатопухирцевої ЗЛ [2, 3, 5] і 30000 — 50000 К або навіть більше для однопухирцевої [1, 6]. Основною причиною таких розходжень, можливо, є втрата сферичної форми пухирців при їх колапсі. Це може призводити до зменшення тиску парогозової суміші вередині них і відповідного зменшення температур, що досягаються при цьому. Відхилення від сферичної форми може ініціюватися в багатопухирцевій кавітаційній області внаслідок взаємодій між пухирцями за допомогою ударних хвиль і гідродинамічних сил. Особливо сильно

взаємодіють пухирці в складі стійких утворень: кластерів і стримерів [7, 8]. Іншими факторами, що знижують активність кавітації, є неоднорідність розподілу пухирців за розмірами і екранування внутрішнього об'єму кавітаційної області периферійними пухирцями [9, 10]. При цьому неефективні пухирці великого радіуса поглинають і розсіюють значну частку акустичної енергії, знижуючи тим самим енергію, що могла б бути витрачена на утворення ефективно кавітуючих порожнин і заощаджена ними у фазі розтягування.

Нижче запропоновано новий метод підвищення інтенсивності багатопухирцевої звукolumінісценції шляхом того, що на кавітаційну область, генеровану високочастотним (ВЧ) імпульсно-модульованим ультразвуковим полем, накладається додатково низькочастотне (НЧ) звукове поле.

Схему експериментальних вимірів подано на рис. 1,а. Робоча ємність 1 з внутрішнім діаметром 150 мм і довжиною 250 мм повністю заповнена дистильованою водою при температурі $(23 \pm 1)^\circ\text{C}$. Низькочастотний випромінювач 2 — п'єзокерамічний циліндр (матеріал ЦТС-19) діаметром 100 мм і висотою 40 мм з резонансною

частотою 5 кГц. Високочастотний випромінювач 3 — сегмент п'єзокерамічної сфери (матеріал ЦТС-23) діаметром 45 мм з резонансною частотою 800 кГц. Фокальна пляма ВЧ випромінювача 3 знаходиться на осі НЧ 2. Внутрішня поверхня ємності 1 покрита шаром пористої гуми 4 для поглинання акустичних хвиль. Випромінювачі 2 і 3 збуджуються сигналами з відповідних НЧ та ВЧ електронних генераторів (на схемі не показано). Гідрофон 5 (п'єзокерамічна сфера діаметром 6 мм) розташовано на відстані 25 мм від фокального плями. Через торцеву кришку ємності 1 на рівні фокальної плями ВЧ випромінювача в неї введено світловод фотосенсора 6 діаметром 20 мм. Особливістю методики є попередня дегазація рідини під дією ультразвуку протягом 15 хвилин. У результаті такої обробки частка газу в рідині зменшується на 20—25% у порівнянні зі станом насичення [10] і потім уже мало змінюється під дією ультразвуку в ході експериментів.

Вимірювалася інтенсивність звуколюмінісценції (ЗЛ) при виникненні кавітації окремо ВЧ і НЧ полями, при спільній дії ВЧ і НЧ полів і після відключення НЧ поля. На рис. 1,б наведено приклад реєстрації вихідного сигналу гідрофона (верхня осцилограма) і сигналу фотосенсора (нижня осцилограма). В інтервалі часу АВ працює ВЧ випромінювач. Середня величина сигналу (ЗЛ) L при цьому становить приблизно 17 мВ. Відзначимо, що при повільному розгорненні осцилографа (рис. 1,б) (ЗЛ) малої інтенсивності може маскуватися фоновими імпульсами. Ці імпульси досить рідкі, тому при великій швидкості розгорнення вони практично не заважають вимірам. В інтервалі часу ВС обидва випромінювачі вимкнено. На ділянці CD працює НЧ випромінювач. Величина (ЗЛ) L при цьому становить приблизно 250—270 мВ. На ділянці DE обидва випромінювачі вимкнені. На ділянці EF знову вмикається ВЧ випромінювач, а на ділянці FG працюють обидва випромінювачі. Потім вимикається НЧ сигнал (точка G

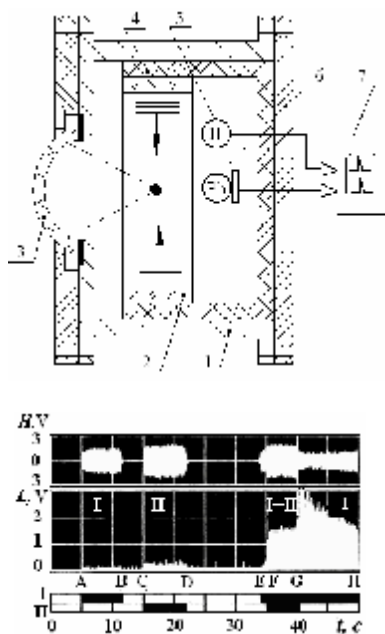


Рис. 1. Функціональна схема експерименту (а), результати реєстрації сигналів гідрофона (Н) і фотосенсора (L): при дії тільки ВЧ поля (I), тільки НЧ поля (II), обох полів одночасно (I+II)

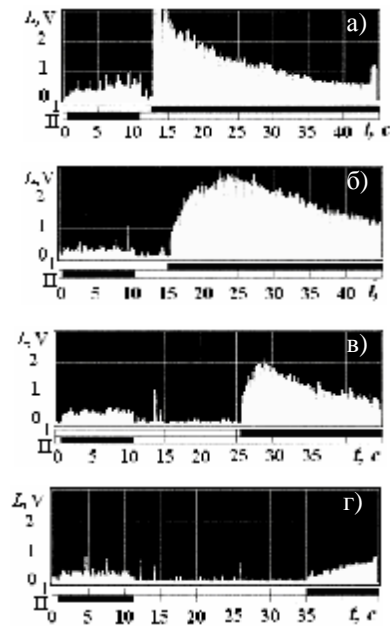


Рис. 2. Залежність (ЗЛ) від часу при окремому ввімненні НЧ (II) і ВЧ (I) полів для різних інтервалів часу: а — $\Delta t=1.5$ с, б — $\Delta t=5$ с, в — $\Delta t=15$ с, г — $\Delta t=25$ с

на часовій осі) і на ділянці GH працює тільки ВЧ випромінювач. На ділянці GH зареєстрована інтенсивність (ЗЛ) при взаємодії двох полів, а на ділянці GH — інтенсивність (ЗЛ), що створюється ВЧ полем після того, як НЧ поле відімкнено. Усереднена величина L на ділянці FG становить біля 1500 мВ.

Таким чином, результат спільної дії двох полів у кілька разів перевершує суму результатів дії кожного з них окремо, тобто спостерігається істотно неадитивне додавання ефектів. Однак найцікавіше, що після відімкнення НЧ поля (точка G) інтенсивність звуколюмінісценції стрибком зростає до значно більших величин і лише після цього повільно зменшується, прямуючи до деякого граничного значення (інтервал GH). При зворотній послідовності увімкнення ВЧ і НЧ полів (на рис. 1,б не показано) другого стрибка величини L не спостерігається, а в момент відімкнення височастотного поля інтенсивність (ЗЛ) практично миттєво зменшується до значення, коли генерується окремо низькочастотне поле.

На рис. 2 наведено результати реєстрації ЗЛ при проведенні експерименту за іншою схемою. Спочатку на короткий інтервал часу вмикалося НЧ поле. Після його вимкнення через якийсь час Δt вмикалося ВЧ поле. Режими роботи НЧ і ВЧ випромінювачів підтримувалися такими ж, як і для умов експерименту, поданого на рис. 1,б. Видно, що пам'ять про стимулюючу дію низькочастотного поля на активність кавітації, яка генерується височастотним полем, зберігається досить довго. При вмиканні ВЧ випромінювача після попереднього озвучування НЧ полем інтенсивність звуколюмінісценції збільшується, досягає деякого максимального значення L_{\max} (рис. 2) і потім повільно зменшується. В міру збільшення проміжку часу Δt рівень L_{\max} зменшується, що обумовлено релаксацією кавітаційних властивостей рідини, викликаних впливом низькочастотного поля. Час повної релаксації,

тобто масштаб пам'яті в часі у кавітаційній області, може досягати декількох годин. За цей час властивості рідини вертаються у початковий стан і інтенсивність звуколюмінесценції при вмиканні високочастотного поля практично дорівнює інтенсивності звуколюмінесценції до впливу низькочастотним полем.

Ймовірний механізм посилення звуколюмінесценції при одночасній роботі двох випромінювачів з різними частотами — це збільшення переданої в рідину потужності й інтерференція полів, у результаті чого можуть виникати значно більші змінні тиски, чим у кожному з полів окремо. При цьому можливе збільшення кількості колапсів кавітаційних пухирців за одиницю часу й відповідне істотне збільшення інтенсивності звуколюмінесценції. Результат додавання двох полів з частотами f_1 і f_2 у двофазному середовищі (рідина й парогазові пухирці), крім цього, включає їх нелінійну взаємодію. Виникають хвилі комбінаційних частот $(f_1 + f_2)$ і $(f_1 - f_2)$, а також вищих гармонік $2f_1$ і $2f_2$.

Отже, спектральний склад результуючого поля істотно розширюється, що може сприяти резонансному колапсу пухирців більш широкого діапазону розмірів.

Інший механізм полягає в наступному. Низькочастотне поле є квазістатичним порівняно з високочастотним. У півперіод розрідження пружної хвилі низькочастотного поля розміри кавітаційних зародків у рідині збільшуються [11]. Тому збільшується й кількість пухирців, які захлопуються під дією високочастотного поля, що в підсумку може приводити до збільшення інтенсивності звуколюмінесценції. У фазі стиску низькочастотної хвилі підвищений статичний тиск сприяє більш швидкому колапсу цих пухирців. Однак, як витікає з даних, поданих на рис. 1 і рис. 2, ці механізми не є переважаючими. Дійсно, їхній прояв можливий тільки коли обидва поля увімкнені. У той же час, у момент вимикання низькочастотного випромінювача спостерігається ще більший ріст інтенсивності звуколюмінесценції. Цими факторами, крім цього, не пояснюється наявність ефекту тривалої післядії низькочастотного поля (див. рис. 2).

Можливим механізмом посилення ЗЛ є генерування нестабільних зародків кавітації при колапсі великих кавітаційних пухирців у НЧ полі. Дійсно, відповідно до [11], коли пухирець захлопується, то може розпадатися на велику кількість дрібних осколків (декілька десятків) з розмірами, на один — два порядки меншими від розмірів початкового пухирця. Ці фрагменти пухирців можуть підійти за резонансними розмірами як зародки для кавітації у ВЧ полі. У результаті кількість колапсуючих пухирців значно збільшується, що й приводить до збільшення інтенсивності звуколюмінесценції. Після вимкнення низькочастотного поля ці зародки повільно розчиняються, зменшуючись у розмірах, їх резонансна частота збільшується порівняно з частотою високочастотного поля. Інтенсивність звуколюмінесценції при цьому також повільно зменшується.

Таким чином, стимулювання кавітації, що генерується ВЧ полем, за допомогою короткочасного попереднього або одночасного впливу на рідину НЧ полем звукового діапазону дає змогу істотно збільшити інтенсивність ЗЛ.

Явища звуколюмінесценції та кавітаційної ерозії поверхні твердих тіл взаємозв'язані. Тому слід припустити, що одночасна дія звукового й ультразвукового полів істотно різних частот значно пришвидшить руйнування твердих матеріалів. Це може бути корисним у різних акустичних технологіях: очищення деталей машин від технологічних і експлуатаційних забруднень, емульгування нерозчинних одна в іншій рідин, диспергування твердих частинок у рідині тощо. Для з'ясування ролі згаданих механізмів у задачах інтенсифікації фізико-механічних процесів у рідині потрібно провести додаткові дослідження.

Література

1. Hiller R., Putterman S.J., Barber B.P. Spectrum of synchronous picosecond sonoluminescence // Phys. Rev. Lett. — 1992. — V. 69, N 8. — P. 1182—1184.
2. Matula T.J., Roy R.A., Mourad P.D. Comparison of Multi-bubble and Single-Bubble Sonoluminescence Spectra // Phys. Rev. Lett. — 1995. — V. 75, N 13. — P. 2602—2605.
3. Suslick K.S., Mc. Namara III, Didenko Y. Temperature of Multi-bubble Sonoluminescence in Water // Proc. NATO Adv. Study In. St(udy). Sonochemistry & Sonoluminescence. — Boston: Kluwer Publ., 1998.
4. Gimenez G.J. The simultaneous study of light emissions and shock waves produced by cavitation bubbles // Acoust. Soc. Am. — 1982. — V. 71, N 4. — P. 839—846.
5. Didenko Yu.T., Nastich D.N., Pugach S.P. et al. Optical spectra of water sonoluminescence // Ultrasonics. — 1994. — V. 32. — P. 71—76.
6. Bernstein L.S., Zakin M.R., Flint E.B. Cavitation Thermometry Using Molecular and Continuum Sonoluminescence // J. Phys. Chem. — 1996. — V. 100. — P. 6612—6619.
7. Parlitz U., Luther S., Mettin R. et al. Spatio-temporal dynamics of acoustic cavitation bubble clouds // Phil. Trans. R. Soc. Lond. — A. 1999. — V. 357. — P. 313—334.
8. Doynikov A.A., Zavtrak S.T. Radiation forces between two bubbles in a compressible liquid // J. Acoust. Soc. Am. — 1996. — V. 99. — P. 3849—3851.
9. Leighton T.G. The Acoustic Bubble. — London: Academic Press. — 1996. — 604 P.
10. Dezhkunov N.V., Francescutto A., Ciuti P. et al. Enhancement of sonoluminescence emission from a multibubble cavitation zone // Ultrasonics Sonochemistry. — 2000. — V. 7. — P. 19—24.
11. Супотюк М.Г. // Мощные ультразвуковые поля / Под ред. Л.Д. Розенберга. — М: Наука, 1968. — 450 с.

Отримана 12.08.10

Yu. Dudzinski, V. Vitkov

Increase of efficiency of cavitations in the two frequency ultrasonic field

Odesa National Polytechnic University, Odesa

The generation of light was explored in a liquid under the action of ultrasound (sound luminescence) in the field of high-frequency radiator at simultaneous or previous influence on a liquid a low-frequency sound. It is shown that the substantial strengthening of sound luminescence takes place not only during simultaneous work of radiators but also during the long interval of time after disconnecting of low-frequency signal. The effect of long action of low-frequency ultrasonic vibrations is exposed on intensity of sound luminescence, which is generated under the action of high-frequency vibrations. The possible mechanisms of the exposed conformities to the law are considered.