

УДК 628.16

ВПЛИВ ДИСКРЕТНО-ІМПУЛЬСНОГО ВВЕДЕННЯ ЕНЕРГІЇ
НА ВОДУ ТА ВОДНІ СИСТЕМИ**Ободович О. М.¹**, д.т.н., с.н.с., зав. відділом
<https://orcid.org/0000-0001-7213-3118>**Целень Б. Я.¹**, к.т.н., с.н.с.,
<https://orcid.org/0000-0001-5213-0219>**Сидоренко В. В.¹**, к.т.н., с.н.с.,
<https://orcid.org/0000-0001-7735-7719>**Шейко Т. В.²**, к.т.н., учений секретар,
<https://orcid.org/0000-0002-0559-1335>¹Інститут технічної теплофізики НАН України, Київ, Україна²Інститут продовольчих ресурсів НААН, Київ, Україна<https://doi.org/10.31073/foodresources2023-21-13>

Предмет. Стаття присвячена дослідженню впливу дискретно-імпульсного введення енергії на гідродинамічні процеси у рідких водних технологічних середовищах. **Мета.** Визначення специфічних властивостей та пов'язаних з ними явищ, що відбуваються у воді, обробленій в тепломасообмінних апаратах з дискретно-імпульсним введенням енергії. **Методи.** Технологічний процес впливу дискретно-імпульсного введення енергії описаний рівнянням Релея, яке визначає динаміку сферичної бульбашки в об'ємі рідини з урахуванням радіусу бульбашки, тиску та в'язкості. Розподілену в робочому об'ємі енергію концентрують у локальних дискретних точках системи та надалі імпульсно реалізують для досягнення необхідних теплофізичних ефектів. **Результати.** У кавітаційній порожнині протікають реакції трансформування радикалів за участю хімічно активних газів, в результаті цього після колапсу кавітаційної бульбашки в розчин переходять продукти радикального розкладання молекул, що призводить до накопичення у воді молекулярного кисню, перекису водню та інших сполук. Одночасно відбувається зміна структури води з утворенням вільних водневих зв'язків, що зумовлює її підвищену активність та реакційну спроможність. У водних системах активація полягає у зміні ступеня рівномірності розподілу домішок за об'ємом системи, агрегації та диспергації, а також зміні їх активного стану. **Сфера застосування результатів.** Описаний у статті метод дозволить інтенсифікувати проведення технологічних процесів у порівнянні з класичним способом перемішування за допомогою звичайних перемішувачів. Висока швидкість протікання реакцій свідчить про те, що реакції відбуваються у зоні схлопування бульбашки. Це є позитивним технологічним моментом.

Ключові слова: дискретно-імпульсне введення енергії, водні системи, бульбашка, інтенсифікація, масообмін, гідродинамічні процеси.

INFLUENCE OF DISCRETE-PULSE ENERGY INPUT
ON WATER AND WATER SYSTEMS**Olexandr Obodovych¹**, D-r of Science, Engineering, Sen. Res., Head of Department,
<https://orcid.org/0000-0001-7213-3118>**Bohdan Tselen¹**, PhD, Engineering, Sen. Res.,
<https://orcid.org/0000-0001-5213-0219>**Vitalii Sydorenko¹**, PhD, Engineering, Sen. Res.,
<https://orcid.org/0000-0001-7735-7719>**Tamila Sheiko²**, Engineering, PhD, Scientific Secretary
<https://orcid.org/0000-0002-0559-1335>¹Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine²Institute of Food Resources of NAAS, Kyiv, Ukraine<https://doi.org/10.31073/foodresources2023-21-13>

Subject. The article is devoted to the study of the impact of discrete-pulse energy input on hydrodynamic processes in liquid water technological environments. **Purpose.** Determination of specific properties and related phenomena occurring in water processed in heat and mass exchange devices with discrete-pulse energy input. **Methods.** The technological process of the influence of discrete-pulse energy input is described by the Rayleigh equation, which determines the dynamics of a spherical bubble in a liquid volume taking into account the radius of the bubble, pressure, and viscosity. The energy distributed in the working volume is concentrated in local discrete points of the system and is further pulsed to achieve the required thermophysical effects. **Results.** Radical transformation reactions with participation of chemically active gases occur in cavitation cavity, as a result of which after collapse of cavitation bubble products of radical decomposition of molecules pass into solution, which leads to accumulation of molecular oxygen, hydrogen peroxide and other compounds in water. At the same time, the structure of water changes with the formation of free hydrogen bonds, which causes its increased activity and reactivity. In aqueous systems, activation consists in changing the degree of uniformity of distribution of impurities in the system volume, aggregation and dispersion, as well as in changing their active state. **Scope of the results.** The method described in the article will allow intensifying technological processes in comparison with the classical method of stirring using conventional stirring devices. The high reaction rate indicates that the reactions take place in the zone of bubble collapse. This is a positive technological moment.

Key words: discrete-pulse energy input, water systems, bubble, intensification, mass transfer, hydrodynamic processes.

Постановка проблеми. Складні проблеми гідродинамічного дроблення та гомогенізації багатокомпонентних середовищ успішно вирішуються на основі методу дискретно-імпульсного введення енергії – принципово нового способу інтенсифікації гідродинамічних та тепломасообмінних процесів. Принцип дискретно-імпульсного введення та трансформації енергії (ДІВЕ) було запропоновано у роботі [1], як узагальнюючий метод спрямованого, локального та інтенсивного використання концентрованої енергії у рідинних дисперсних системах. Фізичні явища динаміки основних елементів ДІВЕ надалі було теоретично досліджено в літературі [2, 3], а технологічні та інженерні програми цього принципу представлено в літературі [4, 5].

Мета ДІВЕ полягає в інтенсифікації тепломасообмінних та гідродинамічних процесів у технологічних середовищах, а також створенні методики їх оптимізації та способів управління ними. Реалізація методу ДІВЕ передбачає створення великої кількості рівномірно розподілених у дисперсному середовищі робочих органів або робочих елементів, які трансформують стаціонарну теплову, механічну або інші види енергії в енергетично потужні імпульси, дискретні в часі та просторі.

Подібні ефекти зазвичай недосяжні за використання традиційних методів при обробленні дисперсних середовищ навіть за значно більшого рівня питомих енерговитрат.

Метод ДІВЕ здійснюється в тих середовищах, де несуча фаза знаходиться в рідкому стані. Зазвичай це вода чи водні системи. Метод ДІВЕ реалізується в різноманітному тепломасообмінному обладнанні, зокрема в роторно-пульсаційних (імпульсних) апаратах, де рідка фаза піддається впливу кавітації, мікроструменів, вихорів, міжфазної турбулентності.

Ідея ДІВЕ полягає в тому, що попередньо стаціонарно введену та довільним чином розподілену в робочому об'ємі енергію акумулювати (сконцентрувати) у локальних дискретних точках системи та надалі імпульсно реалізувати для досягнення необхідних теплофізичних ефектів.

Найбільш повно і послідовно принцип ДІВЕ до теперішнього часу розглянуто в збірнику [6], а процеси тепломасообміну та гідроаеродинаміки, що супроводжують на макрорівні явища ДІВЕ, викладені в наукових публікаціях [7, 8, 9].

Метою цієї роботи є визначення специфічних властивостей та пов'язаних з ними явищ, що відбуваються у воді, обробленій в тепломасообмінних апаратах з дискретно-імпульсним введенням енергії.

Об'єктом досліджень було тепломасообмінне обладнання, в якому використовуються метод ДІВЕ, зокрема роторно-пульсаційні апарати. На рис. 1 зображено аераційно-окислювальну установку з очищення води з використанням роторно-пульсаційного апарата в якості аератора, диспергатора, змішувача.

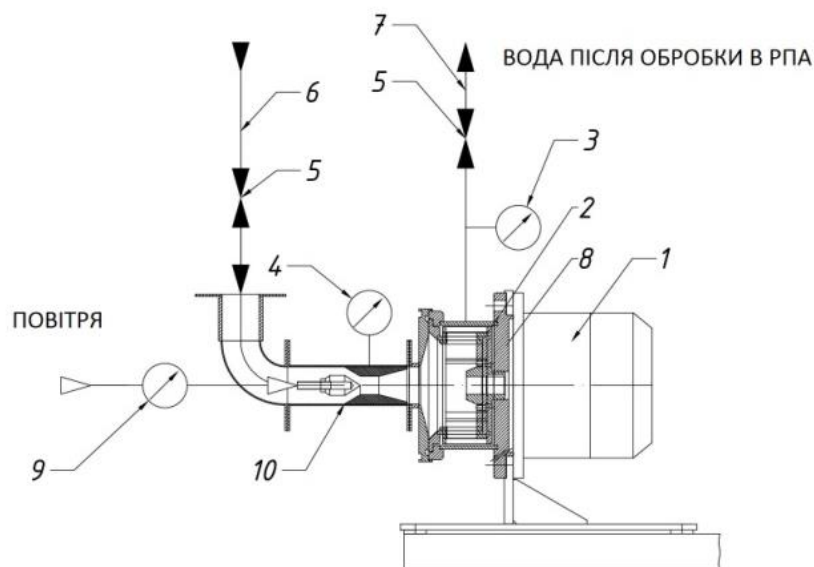


Рис. 1. Схема аераційно-окислювальної установки:

1 – електродвигун; 2 – роторно-пульсаційний вузол (РПУ); 3 – манометр для вимірювання тиску на виході із РПУ; 4 – вакууметр для вимірювання розрядження у вхідному патрубку; 5 – двоходовий кран; 6 – приймальний трубопровід; 7 – випускний трубопровід; 8 – корпус роторно-пульсаційного апарата; 9 – ротаметр; 10 – ежекторний вузол

Результати та їх обговорення. Молекула води є найлегшим та найменшим представником хімічних та ізоелектронних гомологів. Її властивості визначаються максимально неоднорідним розподілом середньої густини електронів по молекулі, у результаті чого на атомах молекули H_2O зосереджено найбільші ефективні заряди.

Унікальні властивості пояснюються наявністю та розвиненістю водневих зв'язків. У системі молекул води водневий зв'язок має кооперативний характер, багато в чому визначаючи структуру води за різних зовнішніх умов. Водневі зв'язки приблизно в 10 разів сильніші за міжмолекулярні взаємодії, характерні для більшості інших рідин.

Суть ДІВЕ полягає у створенні фізичних передумов, що забезпечують при введенні енергії в технологічне середовище, її концентрацію, дискретний та локальний розподіл у просторі або технологічному об'ємі середовища, імпульсний вплив у часі. У процесах методу ДІВЕ реалізуються надвисокі потоки та густини енергії.

Це дозволяє отримати високий фізичний коефіцієнт корисної дії (ККД) корисних ефектів тепло- і масообміну на міжфазній поверхні, що утруднено за використання традиційних методів, наприклад, у класичних перемішувальних пристроях. Введена енергія може бути попередньо сконцентрованою в різноманітних формах теплової, механічної, електричної, електромагнітної та ін.

Урахувавши вищенаведене та розглянувши окремий випадок для сферичної бульбашки в нерухомій рідині через сферичну симетрію, можна виразити наступним рівнянням:

$$\text{rot} \vec{W}_l = 0, \quad (1)$$

тоді

$$\vec{W}_l = \vec{e}_r v_l = \text{grad} \varphi_l. \quad (2)$$

За умови $\rho \cong \text{const}$ і вважаючи рідину нестисливою, маємо

$$\text{div} \vec{W}_l = \Delta \varphi_l = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 v_l) = 0. \quad (3)$$

Інтегруючи рівняння (3) одержуємо фундаментальні рівняння:

$$V_l = \frac{\text{const}}{r^2} \quad \text{та} \quad \varphi_l = -\frac{C}{r} \quad (4)$$

З рівняння балансу мас на межі бульбашки отримуємо умову сполучення нормальної складової швидкості:

$$j = \rho_g j_g = \rho_g \left[\frac{-\frac{\partial \Omega}{\partial t} - (\vec{w}_g \vec{\nabla}) \Omega}{\vec{\nabla} \Omega} \right] = \rho_g j_\partial + \rho_l j_l = \rho_l \left[\frac{-\frac{\partial \Omega}{\partial t} - (\vec{w}_l \vec{\nabla}) \Omega}{\vec{\nabla} \Omega} \right]. \quad (5)$$

Для сферично-симетричної бульбашки (у сферичній системі координат)

$$\Omega = r - R(t) = 0. \quad (6)$$

З умови (5) з урахуванням (6) отримаємо

$$V_l|_{r=R} = \dot{R} - j_l, \quad (7)$$

$$\text{де } \dot{R} = \frac{dR}{dt}.$$

Звідси константа в (4) набуде вигляду

$$\begin{cases} \text{const} = R^2(\dot{R} - j_l), \\ V_l = \frac{R^2}{r^2}(\dot{R} - j_l), \\ \varphi_l = -\frac{R^2}{r^2}(\dot{R} - j_l) \end{cases} \quad (8)$$

Після підстановки (8) рівняння руху, записане в тензорно-інваріантній формі, для ньютонівських суцільних середовищ при подальшому інтегруванні по r від R до ∞ отримаємо динамічне рівняння Релея для розширення межі бульбашки:

$$\dot{R}\ddot{R} + \frac{3}{2}\dot{R}^2 - j_l(\dot{R} + \frac{j_l}{2}) = \frac{P_l|_{r=R} - P_l|_{\infty}}{\rho l} + 2 \int_R^{\infty} \frac{\partial \mu_l}{\partial r} \frac{\partial V_l}{\partial r} dr, \quad \frac{\partial \mu_l}{\partial r} = \frac{\partial \mu_l^0}{\partial T_l^0} \frac{\partial T_l^0}{\partial r}. \quad (9)$$

Зв'язок тиску в рідині $P_l|_{r=R}$ на межі розділу фаз ($r = R$) з тиском у бульбашці встановлюється з умови сполучення за імпульсом, яке при нехтуванні рухом пари та газу в бульбашці (з $\rho_g \ll \rho_l$) дає вираз

$$P_l|_{r=R} = P_g - 4 \frac{\mu_l}{R} V_l|_{r=R} - \frac{2\sigma_l}{R} + \rho_g j_g (V_l - V_g), \quad (10)$$

де $P_g = P_g^0 + P_v$ - сума парціальних тисків відповідно газової та парової фракцій.

$$V_l - V_g = \left(\dot{R} + j_l + \frac{\rho_g}{\rho_l} j_\partial \right) - (\dot{R} + j_g) = j_g \left(\frac{\rho_g}{\rho_l} - 1 \right), \quad (11)$$

тобто останнім членом (10) можна знехтувати.

У разі незначної величини чи відсутності фазових переходів в $j_g = 0$ та за $T_l^0 = \text{const}$ з (9) маємо форму нелінійного рівняння Релея:

$$\dot{R}\ddot{R} + \frac{3}{2}\dot{R}^2 + 4\frac{\mu_l}{\rho_l}\frac{\dot{R}}{R} + \frac{2\dot{R}}{\sigma_l R} = \frac{(P_g^0 + P_v) - P_{l\infty}}{\rho_l} = \frac{\delta P}{\rho_l}. \quad (12)$$

Для простого випадку $P_g = 0$, $\delta P = P_l|_{r=R} - P_l|_{\infty} = \text{const}$ з початковими умовами

$$\left. \begin{aligned} R &= R_0 \\ \dot{R} &= \frac{dR_0}{dt} = \dot{R}_0 \end{aligned} \right\} t = 0. \quad (13)$$

Релеєм отримані такі рішення: для розширення:

$$\dot{R}^2 = \frac{2}{3} \frac{\delta P}{\rho_l} \left[1 - \left(\frac{R_0}{R} \right)^3 \right]; \quad (14)$$

для стиснення:

$$\dot{R}^2 = \frac{2}{3} \frac{\delta P}{\rho_l} \left[\left(\frac{R_0}{R} \right)^3 - 1 \right]. \quad (15)$$

Час колапсу визначають за формулою

$$\tau = 0,915 R_0 \sqrt{\frac{\rho_l}{P_l|_{\infty}}}. \quad (16)$$

Початковий тиск газу в бульбашці радіуса R_0 знаходиться за рівнянням Лапласа:

$$P_{g0} + P_v = P_{l0} + \frac{2\sigma}{R_0}. \quad (17)$$

Результати вказують на те, що при симетричному схлопуванні бульбашки створюються високоінтенсивні поля тисків (до 5–10 тис. атм.) та температур (до 2000°C).

У разі несиметричного колапсу бульбашки, зокрема поблизу стінки, картина схлопування істотно змінюється, тобто процес відбувається з утворенням високошвидкісного кумулятивного мікроструменя. Науковий інтерес викликає випадок асиметричного колапсу бульбашки далеко від стінки.

З досліджень [10], мікрострумені можуть утворюватися і далеко від стінки і стикатися одна з одною. Слід зазначити, що в момент схлопування системи бульбашок біля стінки можливе утворення струменів між сусідніми бульбашками рис. 1.

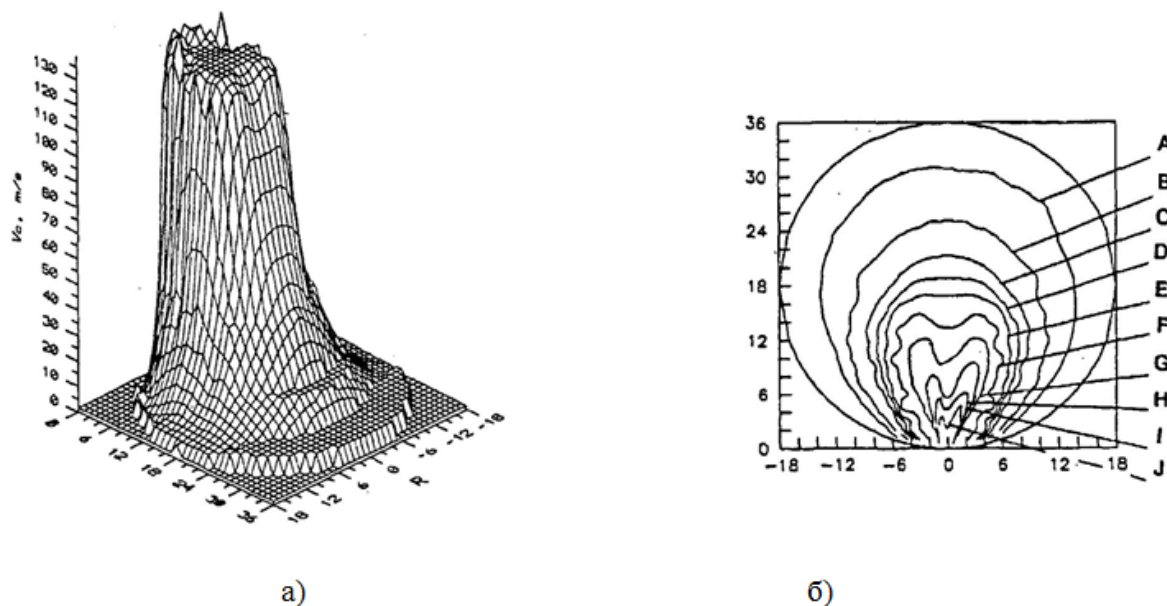


Рис. 1. Візуальне представлення схлопування парової бульбашки у воді поблизу твердої стінки: а – просторова епюра швидкостей; б – результати чисельного експерименту (відстань від центру бульбашки до стінки дорівнює початковому радіусу бульбашки R_0)

На рисунку 1, б показано результати чисельного експерименту для схлопування бульбашки біля стінки, орієнтуючись на джерело [10].

Параметри струменя, що утворюється, сильно залежать від плавності початкової деформації бульбашки. Так, при деформації в 10 % характерна товщина струменя, що утворюється, в п'ять разів менше, а її швидкість вдвічі більша ($V_c = 130$ м/с; $\delta P \approx 203$ МПа), і при подальшому збільшенні початкової деформації швидкість V_c зростає на порядок, надзвичайно посилюючи руйнівну здатність струменя. Тривалість кінцевої стадії колапсу бульбашки $t \approx 10^{-9} - 10^{-8}$ с.

Узагальнивши, можна сказати, що взаємодії великої кількості молекул, ансамблів молекул, організація тієї чи іншої структури, що визначає властивості води і відповідно до її реакційної спроможності, обумовлюються колективними силами Ван-дер-Ваальса і може бути виражений рівнянням у вигляді

$$\frac{PV}{NkT} = \frac{V}{V-b} - \frac{a'N}{VkT} \quad (18)$$

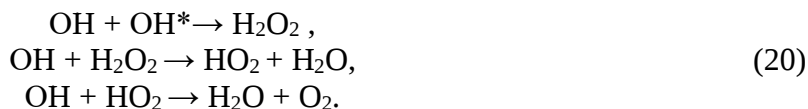
Сили Ван-дер-Ваальса відомі як дисперсійні, далекодіючі. Вони захоплюють області $> 1000 \text{ \AA}$ та визначають стійкість тієї чи іншої структури, фізичну сорбцію та ін.

Час релаксації для низки процесів у воді за $T = 20^\circ\text{C}$ $t = 10^{-11} - 10^{-13}$ с, а для декотрих – до $t \approx 10^{-14}$ с. У зв'язку з тим, що тривалість кінцевої стадії колапсу бульбашки $t = 10^{-9} - 10^{-8}$ с, стають можливими процеси передачі енергії та перезарядки за участю молекул води, шляхетних та активних газів, а також дисоціація молекул води.

Таким чином, під дією дискретно-імпульсного введення енергії відбувається розкладання (механоліз) води. Збурена молекула води, поряд з випромінюванням та дисипацією надлишкової енергії в тепло, може дисоціювати:



За рахунок механолізу води на H^+ і OH^- в результаті кавітаційного впливу відбувається збільшення концентрації O_2 при протіканні в процесі механохімічних реакцій типу



Найважливішою особливістю водних систем, зокрема, є гетерогенність по домішках, яка в процесі кавітаційного впливу може істотно змінюватися. Під впливом дискретно-імпульсного введення енергії у водному розчині, що містить інертні та активні гази, можливе існування різноманітних хімічних реакцій.

У кавітаційній порожнині протікають реакції трансформування радикалів за участю хімічно активних газів та рекомбінації радикалів за час $t \cong 10^{-7} - 10^{-6}$ с. В результаті цих процесів після колапсу кавітаційної бульбашки в розчин переходять продукти радикального розкладання молекул H_2O , виявлені за допомогою методу спінових пасток та рекомбінації радикалів, що призводить до накопичення у воді молекулярного кисню, перекису водню та інших сполук.

Висока швидкість протікання реакцій свідчить про те, що вони відбуваються у зоні схлопування бульбашки. Це є позитивним моментом у ряді інтенсифікації ряду технологічних процесів, наприклад в технології виготовлення бітумних емульсій, екстрагуванні цільових компонентів з рослинної сировини, руйнуванні бактеріальних клітин в технології обробки молока, аераційне окислювання, яке застосовується при підготовці питної води та очищенні стоків. За рахунок обробки води цим методом підвищується швидкість перенесення кисню з газової фази до рідкої, швидкість розчинення кисню у останній, швидкість хімічного та біологічного окислення і, як наслідок, поліпшення якості отриманої води, тощо.

Висновки. В результаті проведених досліджень і розрахунків встановлено, що вода та водні системи, оброблені методом дискретно-імпульсного введення енергії, набувають специфічних властивостей і здатні інтенсифікувати низку технологічних процесів, пов'язаних з обробкою багатокомпонентних рідких середовищ. Активність води проявляється як в макромасштабі так і на макрорівнях. Суть дискретно-імпульсного введення енергії можна звести до дії механізмів розповсюдження хвиль поблизу кавітаційної бульбашки та ударній дії кумулятивних мікроструменів. Цей механізм супроводжується підвищенням температури та тиску поблизу бульбашки, роблячи локальну область біля неї унікальним реактором для проведення різноманітних реакцій та процесів в харчовій, мікробіологічній, хімічній та інших галузях промисловості.

Бібліографія

1. Долінський А. А. Принцип дискретно-імпульсного введення енергії та його використання в технологічних процесах. Вісник АН УРСР. 1984. № 1. С. 39–46.
2. Долинский А. А., Иваницкий Г. К. Теоретическое обоснование принципа дискретно-импульсного ввода энергии. I. Модель динамики одиночного парового пузырька. Промышленная теплотехника. 1995. Т.17, №5. С. 3–28.
3. Долинский А. А., Иваницкий Г. К. Теоретическое обоснование принципа дискретно-импульсного ввода энергии. II. Исследование поведения ансамбля паровых пузырьков. Промышленная теплотехника. 1996. Т. 18, № 1. С. 3–20.
4. Долинский А. А., Иваницкий Г. К. Принципы разработки новых энерго-ресурсосберегающих технологий и оборудования на основе методов дискретно-импульсного ввода энергии. Промышленная теплотехника. 1997. Т. 19, № 4–5. С. 13–25.
5. Obodovych O. M., Sydorenko V. V. Discrete-pulsed energy input (DPIE) is a perspective way to develop resource and energy saving technologies in the food industry. Modern engineering research: topical problems, challenges and modernity: Collective monograph. Riga: Izdevnieciba "Baltija Publishing", 2020. 524 c. <https://doi.org/10.30525/978-9934-588-47-1.13>

6. Микро- и наноуровневые процессы в технологиях ДИВЭ: Тематический сборник статей; под общей ред. А.А. Долинского. Институт технической теплофизики НАН Украины. К.: Академперіодика, 2015. 464 с.

7. Іваницький Г. К., Целень Б. Я., Недбайло А. Е., Коник А. В. Моделювання кінетики кавітаційного скипання рідини. Фізика аерозолів. 2019. № 57. С. 136–146. <https://doi.org/10.18524/0367-1631.2019.57.191970>.

8. Целень Б. Я., Іваницький Г. К., Радченко Н. Л., Гоженко Л. П. Моделювання ефекту гідравлічного удару при осциляції одиночної кавітаційної бульбашки. Фізика аерозолів. 2022. № 60. С. 176–186. <https://doi.org/10.18524/0367-1631.2022.60.267731>.

9. Nedbailo A. Ye., Ivanitsky G. K., Tselen B. Ya., Obodovych O. M., Radchenko N. L. Evaluation of the efficiency of liquid degassing technology based on the principle of hydrodynamic cavitation. *Acta Periodica Technologica*. 2023. T. 54. C. 237–244. <https://doi.org/10.2298/APT2354237N>.

10. Plesset M. S., Chapman R. B. Collapse of an Initially Spherical Vapour in the Neighbourhood of a Solid Boundary. *Journal of Fluid Mechanics*, 1971. V. 47. № 2. P. 125–141. <https://doi.org/10.1017/S0022112071001058>.

References

1. Dolinskyi, A. A. (1984). Pryntsyp dyskretno-impulsnoho vvedennia enerhii ta yoho vykorystannia v tekhnolohichnykh protsesakh [The principle of discrete-pulse energy input and its use in technological processe] *Visnyk AN URSSR*. № 1. P. 39–46. [in Ukrainian].

2. Dolinskii, A. A., Ivanitskii G. K. (1995). Teoreticheskoe obosnovanie printsipa diskretno-impulsnoho vvoda energii. I. Model dinamiki odinochnogo parovogo puzirka. [Theoretical justification of the principle of discrete-pulse energy input. I. A model of the dynamics of a single vapor bubble] *Promishlennaya teplotekhnika*. Volume 17, № 5. P. 3–28. [in russian].

3. Dolinskii, A. A., Ivanitskii, G. K. (1996). Teoreticheskoe obosnovanie printsipa diskretno-impulsnoho vvoda energii. II. Issledovanie povedeniya ansamblya parovikh puzirkov. [Theoretical justification of the principle of discrete-pulse energy input. II. Investigation of the behavior of an ensemble of steam bubbles] *Promishlennaya teplotekhnika*. Volume 18, № 1. P. 3–20. [in russian].

4. Dolinskii, A. A., Ivanitskii, G. K. (1997). Printsipi razrabotki novikh energo-resursosberegayushchikh tekhnologiy i oborudovaniya na osnove metodov diskretno-impulsnoho vvoda energii. [Principles of development of new energy-resource-saving technologies and equipment based on methods of discrete-pulse energy input] *Promishlennaya teplotekhnika*. Volume 19, № 4–5. P. 13–25. [in russian].

5. Obodovych, O. M., Sydorenko, V. V. (2020). Discrete-pulsed energy input (DPIE) is a perspective way to develop resource and energy saving technologies in the food industry. *Modern engineering research: topical problems, challenges and modernity: Collective monograph*. Riga: Izdevnieciba “Baltija Publishing”, 524 p. <https://doi.org/10.30525/978-9934-588-47-1.13>.

6. Mikro- i nanourovnevyye protsessyi v tehnologiyah DIVE: Tematicheskiiy sbornik statey [Micro- and nanoscale processes in DIVE technologies: Thematic collection of articles] (Ed.) A. A. Dolinskii. (2015). Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine. Kyiv: Akademperіodika, 464 p. [in russian].

7. Ivanitsky, G. K., Tselen, B. Ya., Nedbaylo, A. E., Konyk, A. V. (2019). Modeling the kinetics of cavitation boiling up of liquid. *Physics of Aerodisperse Systems*. № 57. P. 136–146. <https://doi.org/10.18524/0367-1631.2019.57.191970>.

8. Tselen, B. Ya., Ivanitsky, G. K., Radchenko, N. L., Gozhenko L. P. (2022). Modeling of water hammer effect during the single cavitating bubble oscillation. *Physics of Aerodisperse Systems*. № 60. P. 176–186. <https://doi.org/10.18524/0367-1631.2022.60.267731>.

9. Nedbailo A. Ye., Ivanitsky G. K., Tselen B. Ya., Obodovych, O. M., Radchenko, N. L. (2023). Evaluation of the efficiency of liquid degassing technology based on the principle of hydrodynamic cavitation. *Acta Periodica Technologica*. 2023. 54. P. 237–244. <https://doi.org/10.2298/APT2354237N>.

10. Plesset, M. S., Chapman, R. B. (1971). Collapse of an Initially Spherical Vapour in the Neighbourhood of a Solid Boundary. *Journal of Fluid Mechanics*, 1971. Volume 47 №2. P. 125–141. <https://doi.org/10.1017/S0022112071001058>.