

ЗАСТОСУВАННЯ ЕФЕКТІВ ГІДРОДИНАМІЧНОЇ КАВІТАЦІЇ В ХАРЧОВІЙ ПРОМИСЛОВОСТІ

Авдєєва Л.Ю. д-р. техн. наук., ст. наук. співр., Макаренко А.А. канд. техн. наук., Щенський Д.Д.
Інститут технічної теплофізики НАН України, м. Київ

Анотація Застосування сучасних наукоємних інноваційних енергозберігаючих технологій і обладнання є необхідною умовою успішного існування промислових підприємств. Актуальність використання кавітаційних технологій пов'язана з ефективним використанням енергії в процесах, пов'язаних з обробкою рідких гетерогенних дисперсних систем для інтенсифікації механічних і фізико-хімічних впливів на стадіях розчинення, перемішування, диспергування, гомогенізації, екстрагування, емульгування, стерилізації та інших. Розвиток і застосування кавітаційних технологій і конструкцій гідродинамічних кавітаційних апаратів можливий в різних галузях промисловості.

Метою статті був аналіз і узагальнення існуючого досвіду використання кавітаційних технологій і обладнання в харчовій промисловості.

Доведено, що значними перспективами характеризуються апарати, в яких використано явище гідродинамічної кавітації. Їх використання дозволяє посилити інтенсивність впливу при обробці складних дисперсних систем і покращити фізичні, хімічні та біологічні характеристики харчових продуктів, таких як, збільшення загальної кількості розчинних сухих речовин, стабільності суспензій і емульсій; збереження значної кількості біологічно активних речовин і вітамінів; посилення антиоксидантної активності, збільшення ступіню гідролізу білка, інактивації небажаних мікроорганізмів і ферментів та ін. Кавітаційні технології і обладнання з успіхом використовуються для виробництва молока, йогуртів, фруктових та овочевих соків, пектину, каротину, таніну. Перспективним напрямком є використання гідродинамічної кавітації в технологіях валоризації лігноцелюлозної біомаси.

Кавітаційний вплив при дезінфекції, стерилізації та аерації води та водних систем дозволяє провести якісне знезараження природних і стічних вод без використання хімічних реагентів і широко застосовується на харчових підприємствах.

Ключові слова: гідродинамічна кавітація, емульгування, гомогенізація, енергоефективність, харчова промисловість, інтенсифікація процесів.

Постановка проблеми. В структурі промислових галузей України харчова промисловість відноситься до числа провідних. В той же час, в більшості, матеріально-технічна база галузі, її технічне і технологічне забезпечення характеризуються високим моральним та фізичним зносом. Внаслідок об'єктивних факторів рівень інноваційної активності підприємств харчової промисловості України не відповідає світовим вимогам, а процеси у вітчизняному машинобудуванні не створюють належних умов для інновацій. Необхідною умовою успішного існування підприємств галузі, прискорення її розвитку, збільшення обсягів виробництва і підвищення конкурентоздатності продукції є застосування сучасних інноваційних енергозберігаючих технологій і обладнання, зменшення втрат сировини, а також в умовах постійного збільшення вартості енергоносіїв - економія енергоресурсів. Все більшого значення набувають питання вибору екологічних технологій, високоефективного обладнання, комплексна переробка і зменшення втрат сировини [1, 2].

В таких складних економічних умовах, одним з високоефективних методів інтенсифікації багатьох технологічних процесів є застосування технологій і обладнання на основі використання позитивних проявів кавітаційних ефектів. Кавітація - явище, яке виникає при створенні розрідження в обмеженій області в результаті місцевих розривів суцільності рідини і формування парових або парогазових бульбашок. Актуальність використання кавітаційних технологій пов'язана з ефективним перетворенням введеної в систему потенційної енергії в кінетичну енергію рідини, дискретно розподілену у просторі і часі. Трансформація механічної енергії в кінетичну, а також її подальший перерозподіл в системі які відбуваються при утворенні і еволюції парогазових бульбашок відносяться до найбільш активних факторів спрямованого впливу на перебіг нано- і мікропроцесів. Цим пояснюється значне підвищення ефективності динамічних впливів на складні гетерогенні системи на міжмолекулярному і молекулярному рівні [3, 4].

Позитивні ефекти кавітаційних явищ широко використовуються в енерговитратних процесах, пов'язаних з обробкою рідких гетерогенних дисперсних систем для інтенсифікації механічних і фізико-хімічних впливів на стадіях розчинення, перемішування, диспергування, гомогенізації, екстрагування, емульгування, стерилізації та інших. Загалом кавітаційні технології знаходять своє застосування в широкій категорії більш екологічних методів обробки при доведеному ефективному використанню енергії та ресурсів [3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останніми роками до корисних проявів використання явища кавітації привернута увага все більшої кількості дослідників для виробництва харчових продуктів з високи-

ми органолептичними властивостями, великим вмістом природних біологічно активних речовин, а також тривалого терміну зберігання. В харчовій промисловості кавітаційний вплив на рідину дозволяє отримати високоякісні біологічно активні розчини, напої, екстракти, емульсії, суспензії, наприклад при виробництві десертів, морозива, молочних і кисломолочних продуктів, майонезів і соусів, фруктових і овочевих пюре, паст і соків [3, 5-7].

Виникнення явища кавітації може відбуватися шляхом гідродинамічного зниження тиску в потоці до критичних значень (гідродинамічна кавітація), ультразвукового випромінювання (акустична), іскрового розряду, імпульсного пропускання струму високої напруги (електрогідравлічний удар). В харчовій промисловості використовують всі типи кавітації, але найчастіше це акустична та гідродинамічна кавітація. Дослідження стосовно застосування акустичної кавітації в харчовій промисловості проводяться вже багато років. Акустичні кавітаційні апарати дозволяють провести ефективну мікробіологічну обробку, а також змінити в бажаному напрямку деякі фізико-хімічні властивості рідких харчових продуктів. Однак, масштабування і енергоефективність є головними проблемами для широкого промислового застосування таких апаратів [8, 9].

Значними перспективами характеризуються апарати, в яких використано явище гідродинамічної кавітації. Існує велика кількість модифікацій проточних статичних або динамічних кавітаційних змішувачів. Кавітаційні апарати статичного типу мають спеціальні нерухомі елементи у вигляді сопел, діафрагм, перегородок, дисків з одним або декількома каналами, що перешкоджають руху потоку. Їх конструкція і кількість розрізняються. Дуже часто статичні кавітаційні апарати виготовляють на основі трубки Вентурі. Для створення тиску рідини перед соплом і виникнення кавітації використовуються насоси різних типів [3, 10-12]. Пристрої динамічного типу [3, 11] представляють собою гідродинамічні установки, конструкція яких передбачає багаторазову перебудову поля швидкостей і зміну напрямку руху потоку рідини і змішуваних компонентів за рахунок використання динамічних елементів (роторів, крильчаток, лопатей) різних конфігурацій. Такі установки виконують функції і насоса і кавітатора одночасно. Застосування того чи іншого типу кавітації, а також вибір конструкції і продуктивності кавітаційного апарата залежить від конкретної технологічної задачі. Перевагами застосування кавітаційних апаратів статичного типу є низька металоємність обладнання, простота і надійність конструкції, невисокі витрати на ремонт і обслуговування [3].

Високошвидкісні ротаційні гідродинамічні кавітаційні апарати в багатьох випадках показали більш високу продуктивність у порівнянні зі звичайними пристроями, а також більший комплекс механічних, хімічних і теплових впливів. Проте дослідження застосування цього типу пристроїв в харчовій промисловості відносно обмежені [13-15].

В технологічних процесах харчових виробництв гідродинамічна кавітація використовується порівняно недавно, але наявний досвід дозволяє стверджувати про те, що кавітаційний є найбільш ефективним з усіх відомих впливів. Останні дослідження показали, що гідродинамічна кавітація має великий потенціал для промислового застосування для обробки різних рідких харчових продуктів, таких як молоко, йогурт, фруктові та овочеві соки. За допомогою використання гідродинамічної кавітації можуть бути значно покращені різні фізичні, хімічні та біологічні характеристики харчових продуктів, такі як, загальна кількість розчинних сухих речовин; індекс седиментації; титруєма кислотність; загальний вміст фенолів; вітамін С; антиоксидантна активність; ступінь гідролізу білка та ін. [13].

Зменшення розміру частинок, що здійснюється в результаті впливу гідродинамічної кавітації, покращує гомогенізацію фруктових і овочевих соків за рахунок модифікації фізичної структури, що призводить до зниження швидкості седиментації і відділення осаду [6, 16].

Важливою властивістю харчових продуктів є в'язкість. Вона забезпечує наявність необхідної консистенції і стійкість до завислих частинок у харчових продуктах. Кавітаційна обробка може викликати помітне зниження в'язкості харчових продуктів. Наприклад, доведено зниження в'язкості концентрату молочного білка з 211,76 мПа·с до 93,35 мПа·с шляхом обробки в динамічному кавітаційному апараті. Автори припустили, що це може бути пов'язане зі зменшенням розміру частинок, а також з тим, що кавітаційна обробка руйнує структуру білкового гелю, що призводить до зниження пружності модуля білків [17].

Ефект підвищення температури, що виникає під впливом гідродинамічної кавітації особливо корисний для обробки харчових продуктів, оскільки в результаті їх синергетичного впливу досягається вищий ефект інактивації мікроорганізмів, а також видалення небажаних термостабільних ферментів, які переважно пов'язані з погіршенням якості соку без використання нагрівальних пристроїв [18, 19].

В той же час, порівняно до традиційної пастеризації негативний вплив гідродинамічної кавітації на рідкі продукти значно менший, що дозволяє зберегти більшу кількість поживних біологічно активних речовин [6].

Доведено, що кавітація є ефективним засобом для обробки молока в безперервному потоці. При виробництві молока кавітаційний вплив підвищує ефективність його гомогенізації і пастеризації, зменшує кількість мікроорганізмів, подовжує термін зберігання. Така обробка молока при кінцевій температурі 70°C впродовж 1–2 с дозволяє знизити загальну кількість мікроорганізмів в 10^3 – 10^5 разів. Крім того, шкідливий вплив кавітації на поживний склад молока, в тому числі вміст мінеральних речовин, жиру, білка та вітамінів, був подібним до короткочасної високотемпературної обробки. При цьому відбувається повне знищення

вегетативних форм дріжджів і плісняви, а також патогенних мікроорганізмів групи кишкової палички і нейтралізація фосфатази. Молоко, оброблене в гідродинамічних кавітаційних апаратах і витримане при 5 °С протягом 14 днів відповідало зміні загальної кількості бактерій *кишкової палички*, а також значенням рН і кислотності, виявилось близьким до показників довго пастеризованого при низькій температурі молока. Також кавітація використовується для підготовки води, яка використовується при відновленні молока з сухого знежиреного залишку [5, 17].

Кавітаційні апарати можуть бути використані для виробництва високоякісних йогуртових продуктів із низьким вмістом жиру та високим вмістом сироваткових білків. Кавітація забезпечує ефективне змішування компонентів і отримання стабільної дрібнодисперсної емульсії без розшаровування впродовж тривалого терміну зберігання. Отримані йогуртові продукти характеризуються відмінними смаковими властивостями і консистенцією [5].

Кавітаційний вплив ефективно використовувати для інтенсифікації процесів розчинення і екстрагування біологічно активних речовин, наприклад, пектину, каротину, таніну і інших цінних речовин. Кавітація змінює властивості водних розчинів і гідрогелів полісахаридів: крохмалю, амілопектину, альгінату натрію, хітозану і ін. Внаслідок її використання досягається висока однорідність фракційного молекулярного складу отримуваних розчинів і екстрактів [20, 21].

Багато біологічно активних речовин отримують кавітаційними методами екстрагування сировини рослинного і тваринного походження. Застосування кавітаційних технологій дозволяє підвищити якість рідких та сухих екстрактів, а також отримати стійкі емульсії [22, 23].

Позитивні результати показало використання гідродинамічної кавітаційної обробки в цукровій промисловості при попередній дефекації дифузійного соку. Промислові дослідження використання гідродинамічної кавітації для інтенсифікації процесу переддефекації показали, що ці умови також значно скорочують тривалість процесу та покращують умови для подальших процесів очищення дифузійного соку [24].

Актуальним напрямком досліджень є використання гідродинамічної кавітації у безперервному процесі для попередньої обробки лігноцелюлозної біомаси для сприяння руйнуванню лігнін-вуглеводної матриці. У даний час лігноцелюлозна біомаса, що у великій кількості утворюються наприклад при виробництві бурякового цукру або переробці цукрової тростини, в сільському та лісовому секторах вважається відходами і не використовується повторно, а йде на виробництво кормів для сільськогосподарських тварин. В той же час після відповідної подальшої обробки її можна використовувати в якості паливних добавок, для виробництва біоенергії, біопалива та біопродуктів. Запропонована попередня обробка лужним перекисом водно жома цукрової тростини за допомогою гідродинамічної кавітації в проточних діафрагмових реакторах.

Запропонована попередня обробка призвела до змін складу матеріалу, головним чином щодо вмісту целюлози та лігніну і на стадії ферментативного гідролізу збільшена частка відновлюючих цукрів. Таким чином, доведено перспективність технології попередньої обробки за допомогою гідродинамічної кавітації для валоризації лігноцелюлозної біомаси. Такий метод попередньої обробки характеризується високою ефективністю, низьким споживанням енергії та легким налаштуванням для великомасштабних виробництв порівняно зі звичайними методами попередньої обробки [25-27].

На даний час кавітаційні ефекти широко використовується як спосіб для дезінфекції, стерилізації та аерації води та водних систем. Кавітаційний вплив дозволяє провести якісне знезараження природних і стічних вод без використання хімічних реагентів і широко застосовується в системах для знезараження каналізаційних стоків переробних підприємств [3, 28-30].

Висновки. Гідродинамічна кавітація є ефективним методом обробки для виробництва безпечних рідких харчових продуктів з високою харчовою і біологічною цінністю, фізичною стабільністю, а також характерними органолептичними показниками. Кавітаційні технології і обладнання є актуальними і перспективними для застосування в різних видах виробництв. Однак, кавітаційна дія на фізичні, хімічні та біологічні характеристики харчових продуктів в деяких випадках є суперечливою. Це викликає доцільність проведення комплексних експериментальних і аналітичних наукових досліджень для оптимізації і вибору конфігурації і геометричних параметрів реактора, а також впливу всіх параметрів процесу, таких як інтенсивність кавітації, тривалість та температура. Це дозволить створити сучасні інноваційні енергоефективні технології для виробництва високоякісних харчових продуктів із застосуванням гідродинамічної кавітації.

References

1. Novikova N. V. (2020) Implementation of innovation in the food industry. Actual problems of improving the quality and safety of production and processing of livestock products: materials of the international scientific and practical conference February 14, 2020. Dnipro. 202-204.
2. Garbar V. A. (2019) Analysis of innovative activity of enterprises of the food industry of Ukraine. Agrosvit. 20, 38-44. <https://www.doi.org/10.32702/2306-6792.2019.20.38>
3. Dolinskii A.A., Avdeeva L.Yu., Makarenko A.A. (2020) Cavitation technologies for the production of nanopreparations. Kyiv: Nauk. Dumka.

4. Dolinskii A.A. Ivanytskii G.K. (2008) Heat and mass transfer and hydrodynamics in vapor-liquid pressure environments. Kyiv: Naukova Dumka.
5. Xun Sun, Xiaoxu Xuan, Li Ji, Songying Chen, Jingting Liu, Shan Zhao, Seulgi Park, Joon Yong Yoon, Ae Son Om, (2021) A novel continuous hydrodynamic cavitation technology for the inactivation of pathogens in milk. *Ultrasonics Sonochemistry*. 71, 105382 <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105382>.
6. Ruly Terán Hilares, Joana Gonçalves dos Santos, Nicole Basic Shiguematsu, Muhammad Ajaz Ahmed, Silvio Silvério da Silva, Júlio César Santos (2019) Low-pressure homogenization of tomato juice using hydrodynamic cavitation technology: Effects on physical properties and stability of bioactive compounds. *Ultrasonics Sonochemistry*. 54, 192-197 <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.01.039>.
7. Rajeshree A. Khaire, Parag R. Gogate (2021) 12 - Application of hydrodynamic cavitation in food processing. *Design and Optimization of Innovative Food Processing Techniques Assisted by Ultrasound*. /Editor(s): Francisco J. Barba, Giancarlo Cravotto, Farid Chemat, José Manuel Lorenzo Rodriguez, Paulo Eduardo Sichertti Munekata. Academic Press. 317-342 <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818275-8.00003-9>.
8. Zenker M., Heinz V., Knorr D. (2003) Application of ultrasound-assisted thermal processing for preservation and quality retention of liquid foods. *J. Food Prot.* 66(9), 1642-1649, <https://doi.org/10.4315/0362-028X-66.9.1642>
9. Demirdöven A., Baysal T. (2008) The use of ultrasound and combined technologies in food preservation. *Food Rev. Int.*, 25(1), 1-11. <https://doi.org/10.1080/87559120802306157>.
10. Kutukov S.E., Promptov M., Koliukh A.N., Stepanov A.Yu., Zverev F.S., Suhovey M.V. (2022) Improving crude oil rheology by hydro-pulse cavitation treatment. *Oil Industry*. 3(1181), 94-98.
11. Gogate P. A, Pandit A.B. (2005) A review and assessment of hydrodynamic cavitation as a technology for the future *Ultrasonics Sonochemistry*, 12, 21–27.
12. . Ivanytskii G.K., Stepaniuk A.R. (2021) Processes and equipment of deep processing of organic raw materials: lecture notes [Electronic resource]: study guide for students.
13. Sun Xun, You Weibin, Wu Yue, Tao Yang, Yoon Joon Yong, Zhang Xinyan, Xuan Xiaoxu (2022) Hydrodynamic Cavitation: A Novel Non-Thermal Liquid Food Processing Technology. *Frontiers in Nutrition*. 9. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.843808>.
14. Arya SS, Sawant O, Sonawane SK, Show PL, Waghmare A, Hilares R, et al. (2020) Novel, nonthermal, energy efficient, industrially scalable hydrodynamic cavitation - applications in food processing. *Food Rev Int*. 36, 668–691. <https://doi.org/10.1080/87559129.2019.1669163>
15. Asaithambi N, Singha P, Dwivedi M, Singh SK. (2019) Hydrodynamic cavitation and its application in food and beverage industry: a review. *Ultrason Sonochem*. 42(5), e13144. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13144>
16. Prateek Katariya, S.S. Arya, A.B. Pandit (2020) Novel, non-thermal hydrodynamic cavitation of orange juice: Effects on physical properties and stability of bioactive compounds, *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 62, 102364. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102364>.
17. Li K, Woo MW, Patel H, Metzger L, Selomulya C. (2018) Improvement of rheological and functional properties of milk protein concentrate by hydrodynamic cavitation. *J Food Eng.* 221, 106–113. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.10.005>
18. Sun X, Kang CH, Park JJ, Kim HS, Om AS, Yoon JY. (2018) An experimental study on the thermal performance of a novel hydrodynamic cavitation reactor. *Exp Therm Fluid Sci.* 99, 200–210. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2018.02.034>
19. Milly P.J., Toledo R.T., Harrison M.A., Armstead D. (2007) Inactivation of food spoilage microorganisms by hydrodynamic cavitation to achieve pasteurization and sterilization of fluid foods. *J Food Sci.* 72(9), 414-422. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2007.00543.x>
20. Alba K., Kontogiorgos V. (2017) Pectin at the oil-water interface: relationship of molecular composition and structure to functionality. *Food Hydrocolloids*. 68, 211-218. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.07.026>
21. Gogate P.R. (2011) Hydrodynamic cavitation for food and water processing. *Food Bioprocess Technol.* 4, 996-1011. <https://doi.org/10.1007/s11947-010-0418-1>
22. Filiaty F. (2020) Application of negative pressure cavitation extraction (NPCE) on total phenolic compound extraction from *Milletia sericea* root. *International Conference on Food and Bio-Industry 2019 IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 443, 012104. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/443/1/012104>
23. Yu Kong, Zuo-Fu Wei, Yu-Jie Fu, Cheng-Bo Gu, Chun-Jian Zhao, Xiao-Hui Yao, Thomas (2011) Efferth, Negative-pressure cavitation extraction of cajanin stilbene acid and pinostrobin from pigeon pea [*Cajanus cajan* (L.) Millsp.] leaves and evaluation of antioxidant activity, *Food Chemistry*, 128(3), 596-605 <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.02.079>.
24. Zheplinska, M., Mushtruk, M., Vasylyv, V., Sarana, V., Gudzenko, M., Slobodyanyuk, N., Kuts, A., Tkachenko, S., Mukoid, R. (2021) The influence of cavitation effects on the purification processes of beet sugar production juices. *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences*. 15, 18-25. <https://doi.org/10.5219/1494>

25. Bimestre, T.A., Júnior, J.A.M., Canettieri, E.V. et al. (2022) Hydrodynamic cavitation for lignocellulosic biomass pretreatment: a review of recent developments and future perspectives. *Bioresour. Bioprocess.* 9, 7. <https://doi.org/10.1186/s40643-022-00499-2>
26. Ruly Terán Hilaes, Rafaela Medeiros Dionizio, Salvador Sánchez Muñoz, Carina Aline Prado, Ruy de Sousa Júnior, Silvio Silvério da Silva, Júlio César Santos. (2020) Hydrodynamic cavitation-assisted continuous pretreatment of sugarcane bagasse for ethanol production: Effects of geometric parameters of the cavitation device. *Ultrasonics Sonochemistry.* 63, 104931. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.104931>.
27. Hilaes R. Terán, Dionizio R.M., Prado C.A., Ahmed M.A., S da Silva S., Santos J.C. (2019) Pretreatment of sugarcane bagasse using hydrodynamic cavitation technology: Semi-continuous and continuous process, *Bioresource Technology.* 290, 121777. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121777>.
28. Parag R Gogate. (2022) Intensified sulfate radical oxidation using cavitation applied for wastewater treatment. *Current Opinion in Chemical Engineering.* 37, 100850. <https://doi.org/10.1016/j.coche.2022.100850>.
29. Pravin B. Patil, Vinay M. Bhandari, Vivek V. Ranade (2021) Wastewater treatment and process intensification for degradation of solvents using hydrodynamic cavitation. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification.* 166, 108485. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2021.108485>.
30. Baowei Wang, Huijuan Su, Bo Zhang. (2021) Hydrodynamic cavitation as a promising route for wastewater treatment – A review. *Chemical Engineering Journal.* 412, 128685. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.128685>

USING OF HYDRODYNAMIC CAVITATION EFFECTS IN THE FOOD INDUSTRY

**Avdieieva L. Yu. Dr.Tech.Sc., Senior Research Officer, Makarenko A. A. Ph. D, Shchenskyi D.D.
Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv**

Abstract. *The use of modern science-intensive innovative energy-saving technologies and equipment is a necessary condition for the successful existence of industrial enterprises. The relevance of the use of cavitation technologies is determined by the effective use of energy in processes related to the processing of liquid heterogeneous dispersed systems for the intensification of mechanical and physico-chemical effects at the stages of dissolution, mixing, dispersion, homogenization, extraction, emulsification, sterilization, and others. The development and application of cavitation technologies and designs of hydrodynamic cavitation devices is possible in various industries.*

The purpose of the article was to analyze and generalize the existing experience of using cavitation technologies and equipment in the food industry.

It has been proven that devices using the phenomenon of hydrodynamic cavitation are characterized by significant prospects. Their use makes it possible to increase the intensity of influence during the processing of complex dispersed systems and improve the physical, chemical and biological characteristics of food products, such as: increasing the total amount of soluble solids, the stability of suspensions and emulsions; preservation of a significant amount of biologically active substances and vitamins; increasing antioxidant activity, increasing the degree of protein hydrolysis, inactivation of unwanted microorganisms and enzymes, etc. Cavitation technologies and equipment are successfully used for the production of milk, yogurt, fruit and vegetable juices, pectin, carotene, and tannin. A very promising direction is the use of hydrodynamic cavitation in technologies for the valorization of lignocellulosic biomass.

Cavitation effects allow conducting high-quality disinfection of natural and wastewater without chemical reagents therefore, they are widely used in the food industry for disinfection, sterilization and aeration.

Key words: hydrodynamic cavitation, emulsification, homogenization, energy efficiency, food industry, process intensification.

Список використаної літератури

1. Новікова Н. В. Впровадження інновації у харчовій промисловості Актуальні проблеми підвищення якості та безпека виробництва й переробки продукції тваринництва: матеріали міжнар. наук.-практ. конф. 14 лютого 2020. Дніпро. 2020. С. 202-204.
2. Гарбар В. А. Аналіз інноваційної активності підприємств харчової промисловості України. *Агросвіт.* 2019. № 20. С. 38-44. <https://www.doi.org/10.32702/2306-6792.2019.20.38>
3. Долінський А.А., Авдеева Л.Ю., Макаренко А.А. Кавітаційні технології для виробництва нанопрепаратів. Київ: Наук. Думка. 2020. 112 с.
4. Долинский А.А. Иваницкий Г.К. Тепломассообмен и гидродинамика в парожидкостных дисперсных средах. К.: Наукова думка, 2008. 382 с.

5. Xun Sun, Xiaoxu Xuan, Li Ji, Songying Chen, Jingting Liu, Shan Zhao, Seulgi Park, Joon Yong Yoon, Ae Son Om, A novel continuous hydrodynamic cavitation technology for the inactivation of pathogens in milk. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2021. V. 71. 105382, <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105382>.
6. Ruly Terán Hilaes, Joana Gonçalves dos Santos, Nicole Bacic Shiguematsu, Muhammad Ajaz Ahmed, Silvio Silvério da Silva, Júlio César Santos, Low-pressure homogenization of tomato juice using hydrodynamic cavitation technology: Effects on physical properties and stability of bioactive compounds. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2019. V. 54. P. 192-197 <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.01.039>.
7. Rajeshree A. Khaire, Parag R. Gogate, 12 - Application of hydrodynamic cavitation in food processing. *Design and Optimization of Innovative Food Processing Techniques Assisted by Ultrasound*. /Editor(s): Francisco J. Barba, Giancarlo Cravotto, Farid Chemat, José Manuel Lorenzo Rodriguez, Paulo Eduardo Sichert Munekata. Academic Press. 2021. P. 317-342 <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818275-8.00003-9>.
8. Zenker M., Heinz V., Knorr D. Application of ultrasound-assisted thermal processing for preservation and quality retention of liquid foods. *J. Food Prot.*, 2003. V.66, Is.9. P.1642-1649, <https://doi.org/10.4315/0362-028X-66.9.1642>
9. Demirdöven A., Baysal T. The use of ultrasound and combined technologies in food preservation. *Food Rev. Int.*, 2008. V. 25 Is.1. P.1-11. <https://doi.org/10.1080/87559120802306157>.
10. Kutukov S.E., Promptov M., Koliukh A.N., Stepanov A.Yu, Zverev F.S., Suhovey M.V.. Improving crude oil rheology by hydro-pulse cavitation treatment. *Oil Industry*. 2022. V. 3, Is. 1181. P 94-98.
11. Gogate P. A., Pandit A.B. A review and assessment of hydrodynamic cavitation as a technology for the future *Ultrasonics Sonochemistry* 2005. №12. P. 21–27.
12. Іваницький Г.К., Степанюк А.Р. Процеси та обладнання глибокої переробки органічної сировини: концепт лекцій [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 292 с.
13. Sun Xun, You Weibin, Wu Yue, Tao Yang, Yoon Joon Yong, Zhang Xinyan, Xuan Xiaoxu. Hydrodynamic Cavitation: A Novel Non-Thermal Liquid Food Processing Technology. *Frontiers in Nutrition*. 2022. V.9. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.843808>.
14. Arya SS, Sawant O, Sonawane SK, Show PL, Waghmare A, Hilaes R, et al. Novel, nonthermal, energy efficient, industrially scalable hydrodynamic cavitation - applications in food processing. *Food Rev Int*. 2020. V.36. P.668–691. <https://doi.org/10.1080/87559129.2019.1669163>
15. Asaithambi N, Singha P, Dwivedi M, Singh SK. Hydrodynamic cavitation and its application in food and beverage industry: a review. *Ultrason Sonochem*. 2019. V.42, Is.5. e13144. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13144>
16. Prateek Katariya, S.S. Arya, A.B. Pandit, Novel, non-thermal hydrodynamic cavitation of orange juice: Effects on physical properties and stability of bioactive compounds, *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2020. V. 62. 102364. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102364>.
17. Li K, Woo MW, Patel H, Metzger L, Selomulya C. Improvement of rheological and functional properties of milk protein concentrate by hydrodynamic cavitation. *J Food Eng*. 2018. V.221. P.106–113. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.10.005>
18. Sun X, Kang CH, Park JJ, Kim HS, Om AS, Yoon JY. An experimental study on the thermal performance of a novel hydrodynamic cavitation reactor. *Exp Therm Fluid Sci*. 2018. V.99. P.200–210. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2018.02.034>
19. Milly P.J., Toledo R.T., Harrison M.A., Armstead D. Inactivation of food spoilage microorganisms by hydrodynamic cavitation to achieve pasteurization and sterilization of fluid foods. *J Food Sci*. 2007. V.72, Is.9. P.414-422. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2007.00543.x>
20. Alba K., Kontogiorgos V. Pectin at the oil-water interface: relationship of molecular composition and structure to functionality. *Food Hydrocolloids*. 2017. V.68. P.211-218. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.07.026>
21. Gogate P.R. Hydrodynamic cavitation for food and water processing. *Food Bioprocess Technol*. 2011. V.4. P.996-1011. <https://doi.org/10.1007/s11947-010-0418-1>
22. Filiaty F. Application of negative pressure cavitation extraction (NPCE) on total phenolic compound extraction from *Milletia sericea* root. *International Conference on Food and Bio-Industry 2019 IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2020. V. 443. 012104. doi:10.1088/1755-1315/443/1/012104
23. Yu Kong, Zuo-Fu Wei, Yu-Jie Fu, Cheng-Bo Gu, Chun-Jian Zhao, Xiao-Hui Yao, Thomas Efferth, Negative-pressure cavitation extraction of cajanin stilbene acid and pinostrobin from pigeon pea [*Cajanus cajan* (L.) Millsp.] leaves and evaluation of antioxidant activity, *Food Chemistry*, 2011 V.128, Is. 3. P. 596-605 <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.02.079>.
24. Zheplinska, M., Mushtruk, M., Vasylyv, V., Sarana, V., Gudzenko, M., Slobodyanyuk, N., Kuts, A., Tkachenko, S., Mukoid, R. The influence of cavitation effects on the purification processes of beet sugar production juices. *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences*. 2021 V.15. P.18-25. <https://doi.org/10.5219/1494>
25. Bimestre, T.A., Júnior, J.A.M., Canettieri, E.V. et al. Hydrodynamic cavitation for lignocellulosic biomass pretreatment: a review of recent developments and future perspectives. *Bioresour. Bioprocess*. 2022. V.9. 7. <https://doi.org/10.1186/s40643-022-00499-2>

26. Ruly Terán Hilaes, Rafaela Medeiros Dionízio, Salvador Sánchez Muñoz, Carina Aline Prado, Ruy de Sousa Júnior, Silvio Silvério da Silva, Júlio César Santos. Hydrodynamic cavitation-assisted continuous pre-treatment of sugarcane bagasse for ethanol production: Effects of geometric parameters of the cavitation device. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2020. V. 63. 104931. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.104931>.
27. Hilaes R. Terán, Dionízio R.M., Prado C.A., Ahmed M.A., S da Silva S., Santos J.C. Pretreatment of sugarcane bagasse using hydrodynamic cavitation technology: Semi-continuous and continuous process, *Bioresource Technology*. 2019. V. 290. 121777. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121777>.
28. Parag R Gogate. Intensified sulfate radical oxidation using cavitation applied for wastewater treatment. *Current Opinion in Chemical Engineering*. 2022. V. 37. 100850. <https://doi.org/10.1016/j.coche.2022.100850>.
29. Pravin B. Patil, Vinay M. Bhandari, Vivek V. Ranade. Wastewater treatment and process intensification for degradation of solvents using hydrodynamic cavitation. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*. 2021. V. 166. 108485. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2021.108485>.
30. Baowei Wang, Huijuan Su, Bo Zhang. Hydrodynamic cavitation as a promising route for wastewater treatment - A review. *Chemical Engineering Journal*. 2021. V. 412. 128685. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.128685>

Отримано в редакцію 02.06.2022

Прийнято до друку 24.09.2022

Received 02.06.2022

Approved 24.09.2022