

УДК 66.084.8

Методика використання ультразвукових кавітаційних технологій у харчовій галузі

Берник І.М.

Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна

Ультразвукові кавітаційні технології набули широкого використання у технологічних процесах харчових виробництв. В роботі розроблена методика використання ультразвукових кавітаційних технологій для обробки середовищ харчової промисловості на основі врахування їхніх реологічних особливостей. Особливість даних досліджень є врахування властивостей на основі розгляду класифікаційних ознак оброблюваних середовищ, які підлягають акустичній обробці. Процес врахування реологічних властивостей полягав у виборі відповідної фізичної моделі, яка адекватно відображає реальні умови зміни параметрів і характеристики процесу обробки. Вибір моделі ґрунтувався на таких базових характеристиках, як деформація і напруження, які виникають під час технологічного впливу і формують напружено-деформований стан середовища. Визначений функціонал, який є інтегральним критерієм оцінки процесу, визначальними параметрами якого є тиск, енергія, інтенсивність і потужність.

Ключові слова: ультразвукова технологія; харчові середовища; реологічні властивості; методика; стадії обробки; параметри; енергія; інтенсивність; потужність.

Огляд існуючих досліджень. Формулювання мети і задач дослідження. Встановлення основних параметрів впливу технологічного середовища на робочий процес ультразвукової кавітаційної обробки наведено в роботах [1, 2], а дослідження хвильового опору рідинно-дисперсних середовищ в умовах ультразвукової кавітаційної обробки в роботах [3-5], Інтенсифікація процесу екстрагування рослинної сировини з використанням ультразвукової кавітації досліджена в роботі [6], а дослідження в'язкості дисперсних середовищ в умовах їхньої інтенсивної обробки в роботі [7]. Апаратне забезпечення ультразвукових кавітаційних технологій приведене в монографії [8]. Ультразвукові технологічні процеси на прикладі розпилення та екстрагування приведено в монографії [9]. Саме на основі наведених робіт сформульовано мету і задачі дослідження.

Мета та задачі роботи. Метою роботи є розробка методики використання ультразвукових кавітаційних технологій для обробки середовищ харчової промисловості. Задачі дослідження:

- здійснити огляд існуючих досліджень;
- запропонувати класифікаційних ознак оброблюваних середовищ, які підлягають акустичній обробці;
- дослідити і врахувати реологічні властивості харчових матеріалів у фізичної моделі;
- розробити алгоритм і методику використання ультразвукових кавітаційних технологій для обробки середовищ харчової промисловості.

Викладення основного матеріалу. Ефективність обробки технологічних середовищ за використання ультразвукових кавітаційних технологій залежить від розуміння фізики процесів та інформації щодо їх складу та реологічних властивостей.

Основними класифікаційними ознаками оброблюваних середовищ, які підлягають віброакустичній обробці, доцільно виділити наступні: тип навантаження на випромінювач, фізичні властивості, умови впливу на випромінювач. Так за режимом навантаження на випромінювач середовища поділяються на:

- акустично необмежені середовища з постійними фізичними параметрами;

- середовища з постійними габаритами, що мають постійні фізичні параметри;
- акустично необмежені середовища зі змінними фізичними параметрами;
- середовища зі змінними габаритами або мають змінні фізичні параметри.

Акустично необмежені середовища з незмінними фізичними властивостями мають стабільний вхідний опір, який не залежить від габаритів середовища. У таких умовах реакція відбитих хвиль на випромінювач є незначною завдяки достатньому рівню поглинання акустичної енергії в об'ємі середовища. Для рідких середовищ вхідний опір визначається їхніми характеристиками, частотою та розмірами випромінювача. У разі акустично обмежених середовищ вхідний опір залежить від габаритів і характеристик відбитих хвиль, таких як амплітуда та фаза. Середовища зі змінними параметрами в умовах розвиненої кавітації демонструють зміну коефіцієнта згасання хвиль і швидкості їх поширення, що безпосередньо впливає на робочі режими та налаштування параметрів.

Формалізація класифікаційних ознак охоплює лише ті аспекти, що пов'язані з розповсюдженням хвиль і взаємодією середовищ із випромінювачем. Подальші дослідження мають бути спрямовані на деталізацію змін реологічних властивостей середовищ, визначення акустичних параметрів та їх впливу на процеси обробки.

Процес врахування реологічних властивостей полягає у виборі відповідної фізичної моделі, що супроводжується математичним описом і визначенням впливу через розрахункові залежності. Вибір моделі ґрунтується на таких базових характеристиках, як деформація і напруження, які виникають під час технологічного впливу і формують напружено-деформований стан матеріалу.

Технологічні процеси під дією кавітації супроводжуються змінами реологічних властивостей середовищ. Зокрема, залежність хвильового опору від радіусу бульбашки та звукового тиску демонструє змінність цих параметрів. Під час виникнення кавітації швидкість звуку поблизу випромінювача зменшується в десятки разів порівняно зі швидкістю звуку в рідині. При підвищенні інтенсивності випромінювання швидкість звуку продовжує знижуватись, що спричиняє утворення гідродинамічної нелінійності, яка є порогом кавітації. Розвинена кавітація характеризується періодичним поширенням фронту хвиль із пульсаціями бульбашок. Важливість врахування реологічних властивостей ілюструється залежністю інтенсивності процесу від в'язкості середовища. Ця характеристика є ключовою при визначенні параметрів кавітаційного впливу та оптимізації технологічних режимів.

На розвиток і перебіг кавітаційного процесу вирішальний вплив мають такі акустичні параметри та властивості середовища:

$$F = f\{A, A_i, f, v, W, P, L, t, l, p, \sigma, c, E, \rho, \mu\},$$

де F - функціонал (інтегральний критерій оцінки процесу); A - амплітуда коливань контактної зони «акустичний апарат – середовище»; A_i – потокова амплітуда коливань середовища на відстані x_i від границі контактної зони «акустичний апарат – середовище»; f – частота коливань акустичного апарату; v – швидкість коливань контактної зони «акустичний апарат – середовище»; W – енергія, P – потужність; L – інтенсивність; t – час; l – характерний розмір середовища у напрямку розповсюдження в ньому акустичної хвилі; p – тиск на середовище; σ – напруження в середовищі; c – швидкість розповсюдження акустичної хвилі в середовищі; E – модуль пружності середовища; ρ – густина середовища; μ – коефіцієнт в'язкості середовища.

Інтегральні параметри цієї функції включають енергію, інтенсивність і потужність. Важливо зазначити, що ультразвукова енергія, яка передається від випромінюючої поверхні апарату до середовища, проходить декілька етапів трансформації, здійснюючи звуковий тиск у рідинному шарі. Така багатоступенева зміна енергії потребує системного підходу для визначення оптимальних режимів обробки, який передбачає детальне дослідження кавітаційного процесу.

Під час перетворення ультразвукової енергії можна виділити кілька основних етапів:

- встановлення залежності між амплітудою звукового тиску та товщиною шару рідини з урахуванням її в'язкості при незмінній амплітуді ультразвукових коливань;
- визначення залежності радіуса кавітаційної бульбашки від амплітуди звукового тиску, а також від товщини шару рідини; знаходження максимального радіусу бульбашки;
- розрахунок амплітуди тиску, що виникає під час сплескування бульбашки максимального радіуса, і порівняння отриманих значень із граничним, при якому забезпечується інтенсивна обробка середовища.

Таким чином, формується система функціональних залежностей між зазначеними величинами.

$$\left. \begin{aligned} P &= f(A, \omega, h, \rho); \\ R_{\text{кав}} &= f(P, \eta, \sigma); \\ P_m &= f(R_{\text{кав}}, h); \\ A &= f(P_m, \eta, \sigma) \end{aligned} \right\}$$

Основою методики дослідження взаємодії акустичного апарату із середовищем є гіпотеза про те, що ефективність генерації кавітаційної енергії визначається структурою і взаємодією елементів ультразвукової технологічної системи.

Параметри введення коливань у середовище залежать від ряду факторів, які забезпечують:

- максимальний рівень передачі енергії від джерела коливань;
- мінімізацію втрат енергії в конструктивних елементах апарату;
- ефективне використання акустичної енергії у процесі обробки середовища;
- стабільність параметрів апарату відповідно до заданих умов і режимів роботи.

Розуміння фізичних принципів і механізмів кавітаційного процесу є основою для визначення ключових параметрів і створення моделі. Структурна модель формується, враховуючи механічні та реологічні характеристики середовища. Додаткові етапи алгоритму визначають зони та області кавітації з урахуванням змін фізичних властивостей дисперсного середовища. Такий підхід дозволяє точніше побудувати математичну модель процесу, вдосконалити методологію досліджень і отримати достовірні результати щодо складності кавітаційного процесу.

Ключові реологічні параметри технологічного середовища включають пружні, в'язкі та пластичні характеристики. Визначення цих властивостей у кавітаційних умовах є основою для підвищення ефективності технологічних процесів. Середовище, як навантаження на ультразвуковий апарат, впливає на амплітуду коливань, яка визначається опором середовища. Методи визначення опору поділяються на дискретні і континуальні. Загальний опір складається з інерційних, пружних і дисипативних компонентів, що формують механічний імпеданс. Активна частина імпедансу відповідає за втрати енергії, а реактивна – за періодичний обмін енергією між різними її формами.

Основні параметри процесу кавітаційної обробки можна поділити на три групи: силові, енергетичні та характеристики середовища. Визначена зміна ультразвукової енергії, яка передається від випромінюючої поверхні апарату до середовища, що враховано відповідним алгоритмом запропонованої методики у вигляді математичного опису кожного етапу процесу від утворення до сплескування кластеру бульбашок. Створена методика використання ультразвукових кавітаційних технологій для обробки матеріалів на основі врахування їхніх реологічних особливостей та апробована на ключових середовищах харчової промисловості.

Висновок. Здійснено огляд існуючих досліджень та визначено методику й задачі досліджень. Запропоновано класифікаційні ознаки оброблюваних середовищ, які підлягають акустичній обробці на основі врахування типу навантаження на випромінювач, фізичних

властивостей та умов впливу на випромінювач. Досліджено і враховано реологічні властивості харчових матеріалів у фізичній моделі, яка відображає такі базові характеристики, як деформація і напруження, які виникають під час технологічного впливу і формують напружено-деформований стан матеріалу. Розроблено алгоритм і методику використання ультразвукових кавітаційних технологій для обробки середовищ харчової промисловості.

Список літератури

1. Луговський О.Ф., Берник І.М. Встановлення основних параметрів впливу технологічного середовища на робочий процес ультразвукової кавітаційної обробки. Вібрації в техніці та технологіях. – 2014. – № 3 – (75). – С. 21–126.
2. Берник І.М. Аналіз параметрів впливу на формування моделі акустичної обробки рідинних харчових середовищ. Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій. Серія «Технічні науки». – 2014. – Вип. 45. – Т. 2. – С. 129–133.
3. Берник І.М., Назаренко І.І., Луговський О.Ф. Дослідження хвильового опору рідинно-дисперсних середовищ в умовах ультразвукової кавітаційної обробки. Mechanics and Advanced Technologies. – 2021. – Vol. 5. – № 3. – Р. 351–358.
4. Bernyk I., Nazarenko I., Luhovskyi O., Svidersky A. Researcher of the influence of low-frequency and high-frequency actions on processing of technological environments. Eureka: Physics and Engineering. – 2018. – № 1. – Р. 73–86.
5. Nazarenko I., Bernyk I. Research of the processes of acoustic cavitation technology for processing dispersed media. Dynamic processes in technological technical systems. – 2021. – Р. 94–109.
6. Берник І.М. Інтенсифікація процесу екстрагування рослинної сировини з використанням ультразвукової кавітації. Техніка, енергетика, транспорт АПК. – 2017. – № 3 (98). – С. 69–73.
7. Берник І.М. Дослідження в'язкості дисперсних середовищ в умовах їхньої інтенсивної обробки. Техніка, енергетика, транспорт АПК. – 2018. – № 1 (100). – С. 62–67.
8. Луговський О.Ф., Мовчанюк А.В., Берник І.М., Шульга А.В., Гришко І.А. Апаратне забезпечення ультразвукових кавітаційних технологій. Монографія. Вінниця: ФОП Кушнір Ю.В., 2021. – 216 с.
9. Луговський О.Ф., Шульга А.В., Берник І.М., Гришко І.А., Мовчанюк А.В., Зілінський А.І. Ультразвукові технологічні процеси. Розпилення та екстрагування: Монографія. Вінниця: Видавець ФОП Кушнір Ю.В., 2022. – 288 с.

Methods of using ultrasonic cavitation technologies in the food industry

Bernyk Iryna

Ultrasonic cavitation technologies are widely used in the technological processes of food production. In this work, a methodology for the use of ultrasonic cavitation technologies for the processing of food industry media based on the consideration of their rheological characteristics has been developed. The peculiarity of these studies is the consideration of properties based on the classification features of the processed media subject to acoustic treatment. The process of taking into account rheological properties consisted in the selection of an appropriate physical model that adequately reflects the real conditions of changing parameters and characteristics of the processing process. The choice of the model was based on such basic characteristics as deformation and stresses that occur during technological impact and form the stress-strain state of the medium. The functional, which is an integral criterion for evaluating the process, has been determined, the defining parameters of which are pressure, energy, intensity, and power.

Keywords: ultrasonic technology; food media; rheological properties; methodology; processing stages; parameters; pressure; energy; intensity; power.