

**Берник І. М.**

д.т.н., доцент

**Вінницький національний  
аграрний університет****Bernyk I.**Doctor of Technical Sciences,  
Associate Professor**Vinnitsia National Agrarian  
University****УДК 66.084.8:66.063.6****DOI: 10.37128/2306-8744-2021-4-11****ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ  
УЛЬТРАЗВУКОВОЇ  
ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ДІЇ ПРИ  
ОБРОБЦІ ХАРЧОВОЇ  
СИРОВИНИ**

Досліджено можливості підвищення ефективності процесів ультразвукової технологічної дії при обробці харчової сировини шляхом врахування їхніх реологічних властивостей. Доведена необхідність визначення класифікаційних ознак харчових середовищ, які є визначальними для реалізації процесів обробки. Встановлено, що до таких ключових ознак відносяться режим навантаження на випромінювач, фізичні характеристики та умови впливу на випромінювач. Виявлено, що за режимом навантаження на випромінювач суттєвий вплив на процес обробки мають акустично необмежені середовища з постійними та змінними фізичними параметрами та габаритами. Ефективність введення коливань в акустично необмежені і обмежені середовища забезпечується шляхом узгодження величини вхідного опору з джерелом коливань і з хвильовою системою. Виявлені фізичні характеристики харчових середовищ, умови впливу на випромінювач. Визначені класифікаційні ознаки відображають основні ключові аспекти підвищення ефективності ультразвукової технологічної дії при обробці харчової сировини, які пов'язані із оцінкою розповсюдження хвиль в середовищі та взаємодією цих хвиль з випромінювачем. Встановлено, що модель Кельвіна-Фойгта є однією з достовірних, що відображає проявлення визначених реологічних властивостей середовища в умовах ультразвукової кавітаційної обробки. Враховуючи перетворення ультразвукової енергії визначені основні етапи процесу. Встановлено залежності амплітуди звукового тиску від товщини шару оброблювального середовища рідини з урахуванням в'язкості рідини. Виявлені залежності радіуса кавітаційної бульбашки від амплітуди звукового тиску, від товщини шару рідини. Досліджено хвильовий опір середовища та отримано аналітичні залежності для визначення інтенсивності технологічного процесу за якої відбувається підвищення ефективності процесів ультразвукової технологічної дії обробки харчової сировини.

**Ключові слова:** модель, реологічні властивості, рідинно-дисперсні середовища, кавітація, пружність, в'язкість, швидкість, тиск, хвильовий опір.

**Постановка проблеми дослідження.**

Забезпечення ефективного процесу ультразвукової кавітаційної обробки рідинно-дисперсних середовищ потребують у якості вихідної інформації мати чітке уявлення про ті

параметри і характеристики середовищ, що відображають їх склад та реологічні властивості, а також необхідну зміну цих характеристик. Такі параметри та



характеристики має відображати класифікація середовища.

Класифікація проводиться тільки тоді, коли є множина об'єктів і необхідно серед них встановити певний порядок, об'єднати їх у певні групи за певними домінуючими ознаками. Якщо класифікація будується за основними властивостями середовища, які є визначальними для процесів їх обробки і відображає їх зміну в процесі обробки, то відкривається можливість більш точного прийняття рішень при визначенні параметрів та режимів обробки. Визначена класифікація дозволяє сформулювати умови доцільності врахування тих чи інших реологічних властивостей рідинно-дисперсних середовищ та обґрунтувати ті параметри, що є базовими для вибору фізичної моделі. Наступним етапом є встановлення параметрів моделі, їх вплив на процес ультразвукової кавітаційної обробки рідинно-дисперсних середовищ.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Загальноприйнята класифікація середовищ, які підлягають віброакустичній обробки, відсутня. Причин декілька. Перш за все відсутня загальноприйнята картина зміни реологічних властивостей середовищ при протіканні процесу кавітаційної обробки. Не встановлені точні значення акустичних параметрів процесу та технологічні аспекти їхньої зміни. Немало важливим фактом є протиріччя в дослідженнях про необхідність врахування в'язких властивостей середовищ, та оцінки ступеня впливу в'язкості на вибір параметрів. Разом з тим, синтезуючи роботи [1 – 5], що мають відношення до класифікації технологічних середовищ, можна виділити такі їх ознаки: режим навантаження на випромінювач, фізичні характеристики та 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.

За фізичними характеристиками:

- рідкі середовища;
- дисперсні середовища;
- тверді середовища.

За умовами впливу на випромінювач:

- нейтральні середовища;
- хімічно агресивні;
- температурно-агресивні.

Акустично необмежені середовища з постійними фізичними параметрами (значення яких залишаються незмінними в процесі ультразвукової обробки) характеризуються тим, що величина вхідного опору середовища, тобто навантаження, прикладене до випромінювача, залишається постійною величиною і не залежить від габаритів оброблювального середовища. Для забезпечення цієї вимоги, розміри і величина поглинання акустичної енергії в одиниці об'єму оброблювального середовища повинні бути достатніми для знехтування реакцією відбитих хвиль на випромінювач.

Для акустично необмеженого рідкого середовища опір випромінювання навантаженого цим середовищем є вхідним опором середовища, визначається його параметрами, частотою, типом і розмірами випромінювача. Для акустично обмеженого середовища з постійними фізичними параметрами і з постійними габаритами, величина вхідного опору залежить від габаритів, так як реакція відбитих хвиль на випромінювач, що залежить від їх амплітуди і фази, визначає значення вхідного опору. Залежно від ступеня поглинання хвиль при відбитті від границь об'єму, займаного середовищем, і в самому середовищі, а також від числа відображень і їх фазових зрушень реакція на випромінювач може бути різною. Так може виявитися, що, внаслідок відносно малої (в порівнянні з поверхнею стінок) площі випромінювача і значного поглинання всіх відбитих хвиль, реакція їх буде настільки мала, що вхідний опір практично може бути визначено як для акустично необмеженого середовища.

**Мета роботи** полягає у встановленні фізичної моделі, що адекватно відображає реологічні властивості рідинно-дисперсних середовищ в умовах їхньої ультразвукової кавітаційної обробки.

#### **Основні результати дослідження.**

Ефективність введення коливальних в акустично необмежені і обмежені середовища може бути забезпечена шляхом узгодження величини вхідного опору з джерелом коливальних (перетворювачем) і з хвилеводною системою. Для середовищ зі змінними параметрами можуть змінюватися коефіцієнт згасання хвиль і швидкість розповсюдження хвиль, що характерно для режимів розвиненої кавітації.

Процедура врахування вказаних властивостей полягає у виборі фізичної моделі із подальшим дослідженням ключових параметрів фізичної моделі середовища та їх вплив на процес ультразвукової кавітаційної обробки. математичним описом й оцінкою впливу у вигляді розрахункових залежностей. З



фізичного погляду вибір моделі зумовлений основними характеристиками – деформацією і напруженням, які виникають під час технологічного впливу й утворюють так званий напружено-деформований стан.

Зазначені основні властивості оброблюваних середовищ є основою будь-якого матеріалу. Відомі три моделі ідеалізованих матеріалів: ідеально пружне тіло (Гука); ідеально в'язка рідина (Ньютона); ідеально пластичне тіло (Сен-Венана) [6]. У реальних середовищах, що мають складну будову, можуть проявлятися всі три реологічні властивості. Для побудови моделі їх з'єднують між собою послідовно або паралельно.

До таких основних моделей належать пружно-пластичні тіла Сен-Венана, в'язко-пружні тіла Кельвіна-Фойгта і Максвелла, в'язко-пластичні тіла Шведова-Бінгама та інші, застосування яких зумовлено тими чи іншими властивостями.

За результатами аналізу існуючих моделей з'ясовано, що модель Кельвіна-Фойгта найбільш достовірно відображає реологічні властивості рідинно-дисперсних середовищ в умовах ультразвукової кавітаційної обробки. Хвильове рівняння руху рідинно-дисперсного середовища має вигляд:

$$\frac{E}{\rho} \frac{\partial^2 x}{\partial z^2} + \frac{\eta}{\rho} \frac{\partial^3 x}{\partial z \partial t} = \frac{\partial^2 x}{\partial t^2}, \quad (1)$$

де  $E$  – модуль пружності середовища;  $\rho$  – густина;  $\eta$  – коефіцієнт в'язкості;  $t$  – час;  $x$  – зміщення;  $z$  – координата, визначення місця розташування розглянутого перетину.

Сучасне уявлення протікання технологічного процесу під дією кавітації характеризується змінною саме зазначених (1) реологічних властивостей середовища [6]. Підтвердженням цьому є, наприклад, залежність зміни хвильового опору ( $\rho_k c_k$ ) / ( $\rho c_p$ ) від радіусу бульбашки  $R$  (рис 1,а), зміни хвильового опору від звукового тиску  $P_m$  (рис. 1,б) [7 – 9].

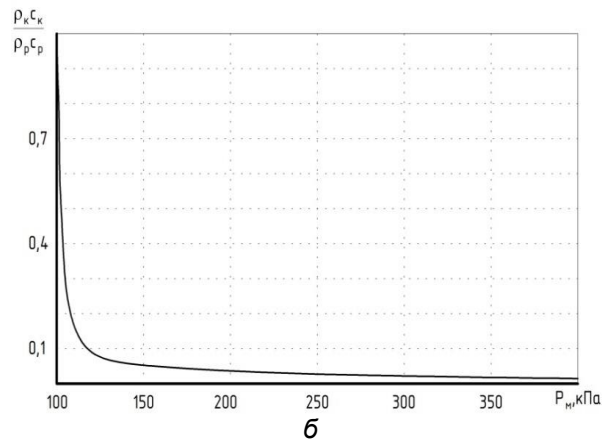
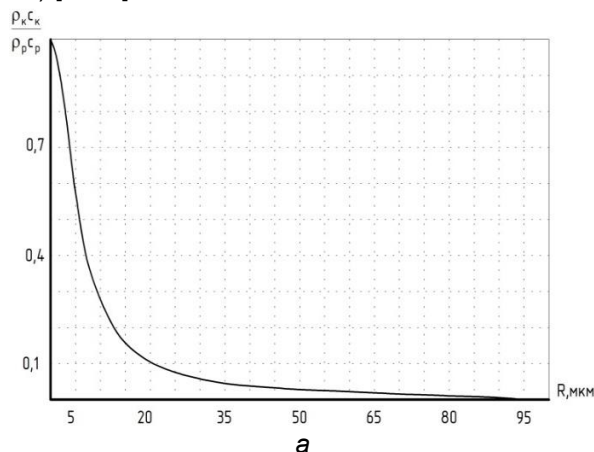


Рис. 1. Залежність зміни хвильового опору: а – від радіусу бульбашки; б – від звукового тиску

На можливість зміни реологічних параметрів в стадіях виникнення кавітації та її розвитку зазначається і в роботі [10] (рис. 2).

Розглянемо пояснення зміни параметрів кавітаційного процесу, що наведені в роботі [10]. В момент виникнення кавітації швидкість звуку в середовищі (див. рис. 2, крива 4) близько випромінювача виявляється в 30 разів менше швидкості звуку в рідині і продовжує падати зі збільшенням інтенсивності випромінювання. За таких умов початок акустичної кавітації (порог кавітації) можна визначити як утворення гідродинамічної нелінійності середовища, що виражається в переході від малих пульсацій газових бульбашок до пульсацій зі сплескуванням, а розвинену кавітацію – як процес періодичного поширення гідродинамічного розриву в вигляді фронту хвилі сплескування газових бульбашок. При значенні  $V$  біля  $4\text{ м/с}$  відбувається перехід до надзвукових рухів акустичного випромінювача. Саме це явище названо в роботі [10] другим порогом акустичної кавітації. Приблизно в цій же області значень  $V$  ширина фронту хвилі  $\delta$  стає менше діаметру газової бульбашки. При цьому, бульбашка настільки швидко потрапляє із зони зниженого тиску в зону підвищеного тиску, що не встигає сплескуватися [11].

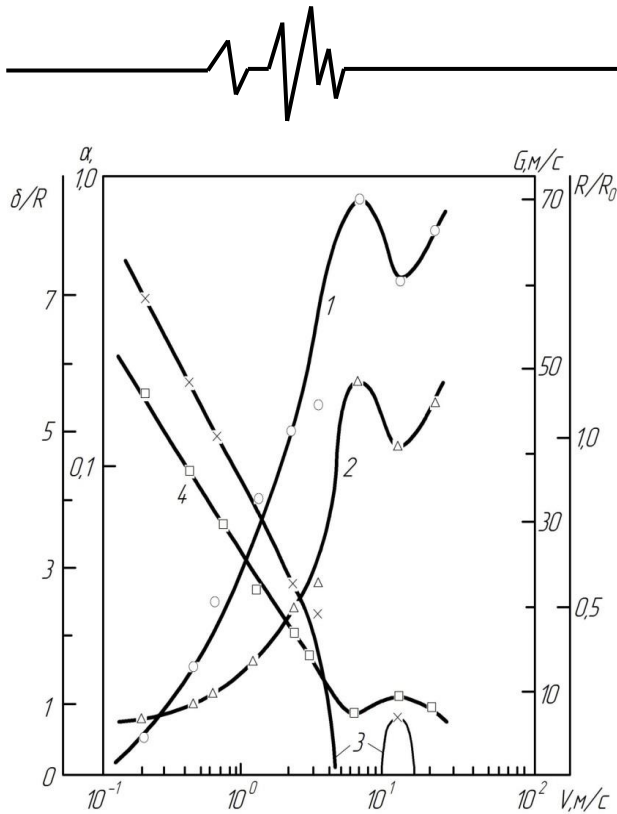


Рис. 2. Зміна параметрів кавітаційного процесу: 1 - індекс кавітації; 2 - відносний розмір газових бульбашок  $R/R_0$  в кавітаційній області; 3 - фазова швидкість звуку  $c$  в кавітаційній області; 4 - відносна ширина фронту ударної хвилі  $\delta/R$

Сутність процесу достеменно може бути з'ясована у виявленні ступеню впливу зміни саме окремих реологічних властивостей технологічних середовищ (в'язкість, пластичність, пружність) на процес кавітації. Прикладом необхідності врахування реологічних властивостей є потреба зміни інтенсивності від в'язкості середовища (рис.3), як важливого показника при визначенні параметрів кавітаційного процесу.

Таким чином, на основі аналізу рівняння (1), наведених параметрів (рис.1-3) доцільно зазначити, що домінуючий вплив на послідовність протікання кавітаційного процесу мають наступні акустичні параметри та властивості середовища:

$$F = f\{A, A_i, f, v, W, P, L, t, l, p, \sigma, c, E, \rho, \mu\}, (2)$$

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;  $\sigma$  – напруження в середовищі;  $c$  – швидкість розповсюдження акустичної хвилі в середовищі;  $E$  – модуль пружності середовища;  $\mu$  – коефіцієнт в'язкості середовища.

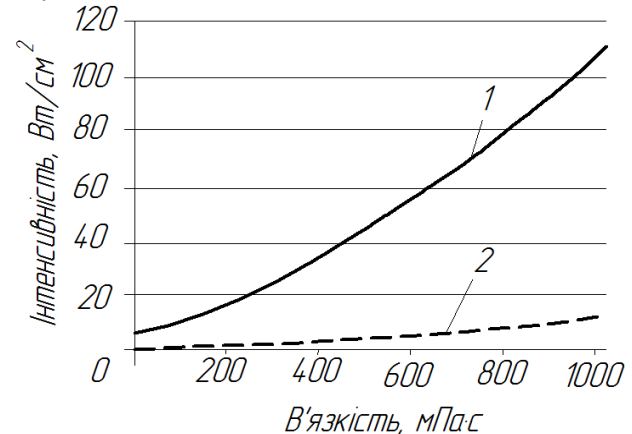


Рис.3. Зміна інтенсивності кавітаційної обробки дисперсних середовищ в залежності від їх в'язкості: 1 – максимальна інтенсивність, 2 – мінімальна інтенсивність

Інтегральними параметрами функції (2) являються енергія, інтенсивність, потужність. Варто зазначити, що ультразвукова енергія від випромінюючої поверхні ультразвукового апарату до середовища має кілька стадій перетворення, здійснюючи звуковий тиск шару рідини. Таке множинне перетворення енергії ультразвукових коливань потребує системного підходу при встановленні оптимальних режимів обробки, який полягає у намаганнях дослідників встановити дійсну картину кавітаційного процесу.

Враховуючи перетворення ультразвукової енергії можна виділити наступні основні етапи розгляду процесу:

- встановлення залежності амплітуди звукового тиску від товщини шару оброблювального середовища рідини з урахуванням в'язкості рідини, при незмінній амплітуді ультразвукових коливань;

- встановлення залежності радіуса кавітаційної бульбашки від амплітуди звукового тиску, а отже, і від товщини шару рідини, визначення максимального значення радіуса бульбашки;

- визначення амплітуди тиску, що виникає при захопленні кавітаційної бульбашки максимально можливого радіуса;

- порівняння отриманої амплітуди із граничним значенням, при якому починається інтенсивна обробка середовища.



Звідси запропоновано систему функціональних залежностей між наступними величинами:

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

де  $p$  – тиск;  $p_m$  – максимальний тиск;  $A$  – амплітуда коливань;  $\omega$  – частота коливань;  $h$  – висота шару,  $R_{кав}$  – радіус кавітаційної бульбашки.

Розглянемо загальну методику визначення тисків, як домінуючих параметрів кавітаційного процесу, виходячи із наступної умови. В будь-який довільний момент часу сума всіх діючих тисків на будь-який елементарний обсяг рідини, утримуючий кавітаційну бульбашку, дорівнює нулю, тобто бульбашка перебуває в стані динамічної рівноваги в кожний розглянутий момент часу. Такими тисками є: рівнодіючий,  $p_p$ , динамічний,  $p_d$ , парогазовий та зовнішній  $p_{зовн.}$ . Тоді стан динамічної рівноваги кавітаційної бульбашки можна записати в наступному вигляді:

$$p_p + p_d - p_{пг} + p_{зовн.} = 0,$$

Існуючі залежності для вказаних тисків визначаються за наступними залежностями.

Рівнодіючий тиск:

$$p_p = \rho \frac{d^2 R}{dt^2}, \quad (3)$$

Динамічний тиск:

$$p_d = \frac{3}{2} \rho \left( \frac{dR}{dt} \right)^2, \quad (4)$$

Тиск парогазової суміші в бульбашці [12]:

$$p_{пг} = p_{г} + p_{п} - p_{пн}, \quad (5)$$

де тиск газу  $p_{г}$ , при зміні розміру бульбашки під дією зовнішніх сил [13]:

$$p_{г} = \left( p_0 - p_{п} + \frac{2\sigma}{R_0} \right) \left( \frac{R_0}{R} \right)^{3y}, \quad (6)$$

Тиск, що створюється силами поверхневого натягу:

$$p_{пн} = 2\sigma / R, \quad (7)$$

Зовнішній тиск, що створюється джерелом коливань:

$$p_{зовн.}(t) = -p \sin \omega t + p_0, \quad (8)$$

Знак "мінус" у виразі означає, що в момент часу  $t=0$  починається півперіод розрідження. Складність зміни тиску засвідчує

графік (рис. 4), наведений в роботі [14]. На відрізку зміни швидкості в межах 10...30 см/с, тиск має ділянки збільшення та зменшення за характером та числовими значеннями. В цитованій роботі [14] не зазначаються причини такої зміни.

Визначення ступені впливу різних видів тиску на процес кавітації розглянуто дещо пізніше, оскільки необхідно знати числові значення параметрів, що входять в залежності (3) – (8). Визначення зміни реологічних властивостей технологічного середовища, що має місце в процесі кавітаційної обробки, якими є в'язкість, пластичність і пружність [15] обумовлена вибором моделі [15 – 21], яка враховує ці зміни, та методів її представлення в математичному описі процесу кавітації під дією якої утворюються бульбашки, їх осциляція, розвиток з наступним сплескуванням.

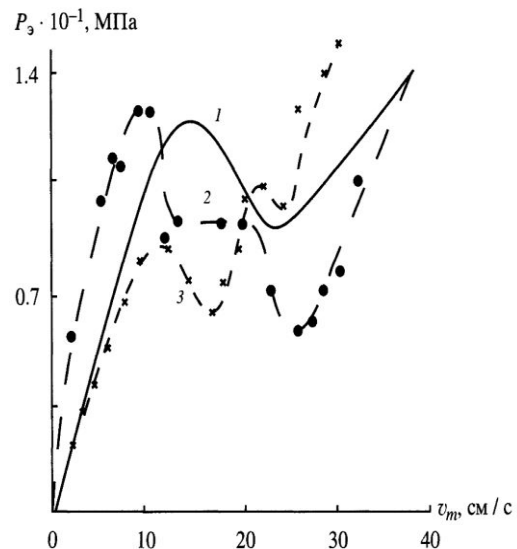
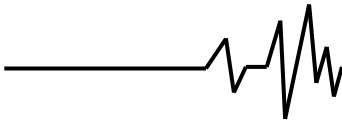


Рис. 4. Залежність зміни тиску від швидкості

Цей процес супроводжується складним масо- і теплопереносом [22] в сформованій кавітаційній області. В роботі [23] показано, що середня щільність енергії та питома потужність, які відповідають моменту захоплення кавітаційної бульбашки у воді під дією звукових коливань відповідно в  $10^3$  та в 10 разів перевищують параметри хвилі збудження. Тому варто зупинитися на оцінці існуючих підходів передачі енергії від акустичного апарату до технологічного середовища [17, 24]. Реалізація лінійного режиму потребує забезпечення умови, за якою бічні розміри поверхні акустичного апарату у напрямку передачі енергії по координаті  $x$  набагато перевищують довжину звукової хвилі ( $\lambda$ ). За другої умови – збереження суцільності руху в зоні контакту апарату і середовища. Тоді



реалізується синусоїдальний режим і утворення звукової хвилі в області середовища  $x > 0$  за законом:

$$x(t) = A \cos(2\pi ft + \varphi_0), \quad (9)$$

де  $\varphi_0$  – початкова фаза, яка визначає початкові ( $t = 0$ ) умови руху кавітатора.

$$p(x, t) = p_0(x) \cos(kx - \omega t) = p_0 e^{-\alpha x} \cos(kx - \omega t), \quad (10)$$

де  $p_0(x)$  – амплітуда акустичного тиску, яка є функцією координати  $x$  і дорівнює  $p_0 e^{-\alpha x}$  де  $p_0 = p_0(0)$ , тиск в зоні контакту при  $x = 0$ .

Інші параметри включають кутову частоту  $\omega = 2\pi f$ , хвильове число  $k = 2\pi/\lambda$  і коефіцієнт розсіювання енергії  $\alpha$ , який є функцією частоти в мегагерцовому діапазоні. Коефіцієнт  $\alpha$  описує передачу енергії від звукової хвилі до середовища переважно через процеси поглинання та розсіювання. Поглинання перетворює акустичну енергію в тепло, переважно через в'язкий опір. У середині водних, як, і в інших технологічних середовищах, існують неоднорідності. Розсіювання – це процес, за допомогою якого неоднорідності спрямовують деяку звукову енергію за межі первісного шляху поширення хвилі. Якщо щільність неоднорідності висока,

$$p(x_0, t) = P_0(x) \cos(kx_0 - \omega t) = p_0 e^{\alpha x} \cos(kx_0 - \omega t), \quad (11)$$

При цьому акустичний тиск у будь-якій точці поверхні апарату на середовище за умовою  $x = x_0$ , фаза якої дорівнює  $kx_0 - \omega t$ , змінюється синусоїдально в часі. Коли плоска звукова хвиля вводиться в рідину можуть виникати кілька фізичних явищ. Оскільки акустичний тиск  $p(x, t)$  змінюється з  $x$ , градієнт тиску, який супроводжує звукову хвилю, надає силу в напрямку  $x$  на одиницю об'єму рідини або в будь-якому місці середовища, де поширюється ультразвукова хвиля, тобто

$$v(x, t) \approx v_0 e^{-\alpha x} \cos(kx - \omega t) \approx \frac{P_0}{\rho_0} c e^{-\alpha x} \cos kx - \omega t, \quad (13)$$

Рівняння (13) вказує на те, що для хвилі, яка поширюється в однорідному середовищі з малим згасанням, акустичний тиск і швидкість частинки знаходяться в фазі, а відношення між ними є постійним:

$$\frac{p(x, t)}{v(x, t)} = \rho_0 c = Z, \quad (14)$$

де  $Z$  – акустичний питомий опір [25].

Одновимірною падаючою хвилею, що розповсюджується вздовж напрямку  $x$ , може бути представлена  $p(x, t) = p_0 \cos(kx - \omega t)$ , припускаючи, що загасання  $\alpha = 0$ . Тепер, коли має місце ідеальний відбивач, перпендикулярний до напрямку поширення

Наприклад, якщо  $\varphi_0 = 0$ , то переміщення  $x$  і швидкість  $V$  акустичного апарату  $x = A \sin t$ ,  $V = dx/dt = A \cos t$  відповідно, коли  $t = 0$ . У лінійному режимі вібраційний тиск хвилі є функцією  $x$  і  $t$ , і, як один із головних параметрів енергії тиску, визначається за залежністю:

може мати місце багатократне розсіювання. Іншими словами, в таких випадках звукова енергія може розсіюватися між кількома неоднорідностями кілька разів, перш ніж вона зменшується поглинанням. Для загального розгляду залежностей можна прийняти, що коефіцієнт  $\alpha$  для води є незначним, а показник  $e^{-\alpha x}$  може вважатися рівним одиниці.

Частота та довжина хвилі пов'язані співвідношенням

$$f\lambda = c,$$

де  $c$  – фазова швидкість.

У воді фазова швидкість при  $20^\circ \text{C}$  приблизно дорівнює  $1500 \text{ м/с}$  [22]. Якщо  $x = x_0$ , то вираз для тиску  $p(x, t)$  для контактної зони «кавітатор – середовище» в рівнянні (10) буде мати вид:

локальне значення тиску представляється, як  $-\partial p(x, t) / \partial x$ .

За другим законом Ньютона:

$$p_0 \frac{\partial v(x, t)}{\partial t} = \frac{\partial p(x, t)}{\partial x}, \quad (12)$$

Підставляючи рівняння (10) в рівняння (11) і припускаючи, що  $\alpha x \ll 1$  отримують залежність для визначення швидкості:

хвилі, дозволяючи падаючій хвилі накладатися на іншу хвилю, що біжить в напрямку «- $x$ » (представленому в рівнянні, замінивши аргумент « $kx - \omega t$ » на « $kx + \omega t$ »), отримаємо постійну хвилю, заданої формулою:

$$p(x, t) = 2p_0 \cos kx \cos \omega t$$

Дана залежність демонструє характер зміни тиску за умови відсутності дисипативного члена ( $\alpha = 0$ ). Складні максимальні значення тиску відбуваються при  $\cos kx = \pm 1$ , і т.д. за значеннях  $x = 0, \lambda/2, \lambda, 3\lambda/2$  і т.д. Аналогічно, вузли мінімальних значень тиску знаходяться тоді, коли  $\cos kx = 0$ , тобто за значення  $x = \lambda/4, 3\lambda/4, 5\lambda/4$  і т.д. Відстань між послідовними вузлами тиску становить  $\lambda/2$ . Цей аналіз є



важливим для визначення зон раціонального вибору лінійного режиму. Однак, неврахування коефіцієнта  $\alpha$  є справедливим виключно для резонансного режиму. Акустична енергія передається в технологічне середовище поряд з поширенням ультразвуку. Через хвильовий рух на будь-якій даній відстані  $x$  від джерела звуку (акустичного апарату) в середовищі

$$I(x) = \frac{1}{T} \int_0^T p_0 e^{-2\alpha x} \cos(kx - \omega t) v_0 \cos(kx - \omega t) dt = \frac{1}{2} p_0 v_0 e^{-2\alpha x} =$$

$$= \frac{1}{2} p(x) v(x) = \frac{1}{2} \frac{p_0^2 e^{-2\alpha x}}{\rho c} = I_0 e^{-2\alpha x}$$
(15)

де  $I_0 = \frac{p_0^2}{2\rho c}$  – інтенсивність при  $x=0$ .

Інтенсивність може бути представлена через інші параметри кавітаційного процесу

$$I = \frac{p^2}{2\rho c} = \frac{1}{2} \rho c \omega^2 A^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{\rho c}{\omega^2} \alpha^2 = \frac{1}{2} \rho c v_m^2, \quad (16)$$

$$P = \sqrt{2\rho c I}; \quad A = \frac{1}{\omega} \sqrt{\frac{2I}{\rho c}}, \quad v = \sqrt{\frac{2I}{\rho c}}; \quad \alpha = \omega \sqrt{\frac{2I}{\rho c}}, \quad (17)$$

Отже, інтенсивність є тим ключовим критерієм, який визначає рівень енергії.

Для лінійного режиму, як це слідує із формул (16) та (17), підвищення числових значень інтенсивності, що необхідно для в'язких середовищ, необхідно значно збільшувати амплітуду або частоту акустичного апарату. Разом з тим, це потребує значного підвищення, що безумовно не завжди ефективно. Дійсно, підвищення витраченої енергії, як слідує із відомого співвідношення  $E = W \Delta t$ , потребує значного збільшення потужності (рис. 5) [27].

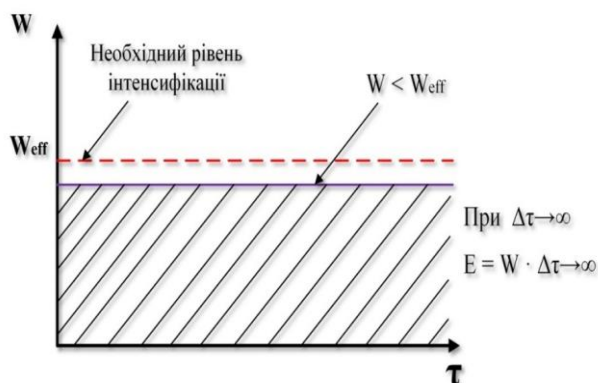


Рис. 5 Лінійне синусоїдальне введення енергії в технологічне середовище

поширюється акустична енергія. Для плоскої неспокосованої рухомої хвилі тиск, усереднена за часом швидкість (13), при якій робота виконується через будь-який подібний хвильовий рух, що приходить на одиницю площі, є акустичною інтенсивністю ( $I$ ) [26], яка є середнім значенням часу ключових параметрів  $p(x, t)$  і  $v(x, t)$  протягом періоду  $T=1/f$ .

За відомим значенням інтенсивності, щільності середовища, частоти коливань, швидкості розповсюдження хвиль, можна отримати числові значення тиску, амплітуди, швидкості та прискорення коливань контактної зони

Відомо інший підхід до інтенсифікації тепломасообмінних і гідромеханічних процесів в дисперсних середовищах. Цей підхід представляє собою нелінійне, дискретно-імпульсне введення енергії. Сутність його полягає у швидкій зміні зовнішнього тиску (рис. 6) [28].

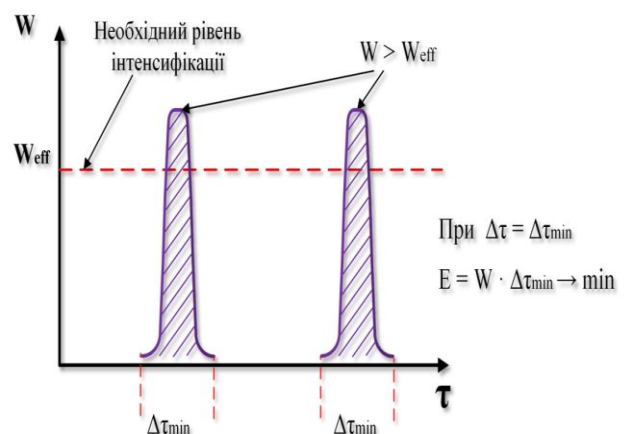
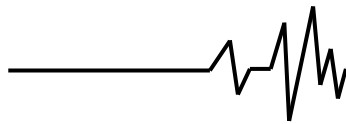


Рис. 6. Дискретно-імпульсне введення енергії в технологічне середовище

#### Висновки

1. Визначені класифікаційні ознаки рідинно-дисперсних середовищ, які відображають ту частину, що пов'язана із



оцінкою розповсюдження хвиль в середовищі та взаємодією з випромінювачем.

2. Обґрунтовано застосування фізичної моделі Кельвіна-Фойгта, що відображає проявлення реологічних властивостей рідинно-дисперсних середовищ для умов ультразвукової кавітаційної обробки.

3. Досліджено ключові параметри фізичної моделі середовища та їх вплив на процес ультразвукової кавітаційної обробки.

#### Список використаних джерел

1. Федоткин И. М., Жарик Б. Н., Погорельский Б. И. Интенсификация технологических процессов пищевых производств. К.: Техника, 1984. 176 с.

2. Овчинников П.Ф. Виброреология. К.: Наукова думка, 1983. 272с.

3. Стебновский С.В. Обобщенная реологическая модель кавитирующих конденсированных сред. *Прикладная механика и техническая физика*. 2001. Т. 42. №3. С. 116–129.

4. Физические величины: справочник. Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова, М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.

5. Рейнер М. Реология. М.: Наука, 1965. 224 с.

6. Beryk I., Luhovskyi O. IX Research and calculation of rational modes and parameters of an ultrasonic cavitator. International Conference "Heavy Machinery-НМ 2017", Zlatibor, 28 July – 1 July 2017. P. 109 – 112.

7. Beryk I. Estimation of efficiency of ultrasonic cavitation processing of technological media on energy criteria. *Mechanics and Advanced Technologies*. 2020. №2 (89). С. 18–28.

8. Литвиненко О.А., Некоз О.І., Немирович П.М., Кондрат З. Кавітаційні пристрої в харчовій, переробній та фармацевтичній промисловості. К.: РВЦ УДХТ, 1999. 87 с.

9. Beryk I., Luhovskyi O., Wojcik W., Shedreyeva I., Karnakova G. Theoretical Investigations of the Interaction of Acoustic Apparatus with Technological Environment Working Process. *Przeglad Elektrotechniczny*. 2019. №1(4). P. 32–37.

10. Федоткин И.М., Немчин А.Ф. Использование кавитации в технологических процессах. К.: Вища школа. Изд-во при Киев. Ун-те, 1984. 68 с.

11. Вітенько Т.М. Гідродинамічна кавітація у масообмінних, хімічних і біологічних процесах. Тернопіль: Видавництво ТДТУ ім. І Пулюя, 2009. 224 с.

12. Wong J.E., Muñiz D.B., Martínez G.C., Belmares R.E., Aguilar, C.N. Ultrasound-

assisted extraction of polyphenols from native plants in the Mexican desert. *Ultrason. Sonochem*. 2015. № 22. P. 474–481.

13. Агранат Б.А., Дубровин М.Н., Хавский Н.Н., Эскин Г.И. Основы физики и техники ультразвука. М.: Высшая школа, 1987. 352 с.

14. Сиротюк М.Г., Гаврилов Л.Р. Акустическая кавитация. М.: Наука, 2008. 271с.

15. Moshaii A. and Sadighi-Bonabi R.(2004). Role of liquid compressional viscosity in the dynamics of a sonoluminescing bubble. *Phys. Rev. E*. 2004. V. 70.

16. Луговський О. Ф., Берник І. М. Фізична модель ультразвукового кавітаційного вилучення пектину з вторинної рослинної сировини. *Вісник національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» серія «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження»*. 2010. №1 (5). С. 25–30.

17. Маргулис М. А., Маргулис И. М. Динамика ансамбля пузырьков в кавитирующей жидкости. *Журнал физической химии*. 2007. Т.81. №12. С. 2290-2295.

18. Шестаков С. Д. Многопузырьковая акустическая кавитация: математическая модель и физическое подобие. *Электронный журнал "Техническая акустика"*. 2010. №14. 16 с.

19. Beryk I. Research parameters of ultrasound processing equipment dispersed in technological environment. *Motrol. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture*. 2016. Vol. 18. № 3. P. 3 – 13.

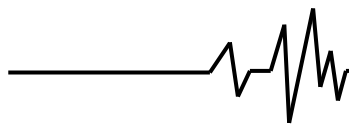
20. Лукьянченко М., Джелал А., Струбалин А. Влияние технологических параметров на прочность различных видов вяжущих при ультразвуковой обработке водотвердых суспензий. *Motrol. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture*. 2013. Vol. 15. №5. P. 17–22.

21. Луговський О. Ф., Берник І. М. Аналіз методів визначення швидкості розповсюдження хвиль в кавітаційній області ультразвукового поля. *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*. 2016. № 18 С. 10–15.

22. Du T., Huang Ch., Wang Y. A Numerical Model for Evolution of Internal Structure of Cloud Cavitation. *ISROMAC-2016 (International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery)*. 2016. April. Hawaii, Honolulu. 10-15.

23. Хмелев, В. Н., Князев А. Н., Барсуков Р. В., Шалунов А. В. Измерение параметров технологических сред, подвергаемых воздействию ультразвуковых колебаний высокой интенсивности. *Измерения, автоматизация и моделирование в*





промышленных и научных исследованиях: межвузовский сборник. 2001. С. 262-267.

24. Берник І. М., Луговський О. Ф. Встановлення основних параметрів впливу технологічного середовища на робочий процес ультразвукової кавітаційної обробки. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2014. № 3(75). С. 121–126.

25. Shirsath, S.R.; Sonawane, S.H.; Gogate, P.R. Intensification of extraction of natural products using ultrasonic irradiations. A review of current status. *Chem. Eng. Process. Process Intensif.* 2012. № 53. P. 10–23.

26. Шутилов В. А. Основы физики ультразвука: учеб. пособие. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1980. 280 с.

27. Долинский А. А., Иваницкий Г. К. Теплообмен и гидродинамика в парожидкостных дисперсных средах. Киев: Наук. думка, 2008. 381 с.

28. Долинский А.А., Накорчевский А.И. Принципы оптимизации массообменных технологий на основе метода дискретно-импульсного ввода энергии. *Промышленная теплотехника*. 1997. Т. 19. № 6. С. 5 – 9.

### References

1. Fedotkin I. M., ZHarik B. N., Pogorzhel'skij B. I. (1984) Intensifikaciya tekhnologicheskikh processov pishchevykh proizvodstv [Intensification of technological processes in food production]. K.: Tekhnika, 1984. 176. [In Russian].

2. Ovchinnikov P.F. (1983.) Vibrorheologiya [Vibrorheology]. K.: Naukova dumka. 272. [In Russian].

3. Stebnovskij S.V. (2001) Obobshchennaya reologicheskaya model' kavitiruyushchikh kondensirovannykh sred [Generalized Rheological Model of Cavitating Condensed Matter]. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika*. T. 42. №3. 116–129. [In Russian].

4. Fizicheskie velichiny: spravochnik [Physical quantities: a reference book]. (1991) Pod, red. I.S, Grigor'eva, E.Z, Mejlianova, M.: Energoatomizdat. 1232. [In Russian].

5. Rejner M. (1965) Reologiya [Rheology]. M.: Nauka. 224. [In Russian].

6. Beryk I., Luhovskiy O. (2017). Research and calculation of rational modes and parameters of an ultrasonic cavitator. IX International Conference "Heavy Machinery-HM 2017", Zlatibor, 28 Jule – 1 July. P. 109 – 112.

7. Beryk I. (2020.). Estimation of efficiency of ultrasonic cavitation processing of technological media on energy criteria. *Mechanics and Advanced Technologies*. №2 (89). С. 18–28.

8. Lytvynenko O.A., Nekoz O.I., Nemyrovych P.M., Kondrat Z. (1999) Kavitatsiini prystroi v kharchovii, pererobnii ta farmatsevtichnii promyslovosti [Cavitation devices in the food, processing and pharmaceutical industries]. K.: RVTs UDKhT. 87. [in Ukrainian].

9. Beryk I., Luhovskiy O., Wojcik W., Shedreyeva I., Karnakova G. (2019). Theoretical Investigations of the Interaction of Acoustic Apparatus with Technological Environment Working Process. *Przeglad Elektrotechniczny*. 2019, №1(4). 32–37.

10. Fedotkin I.M., Nemchin A.F. (1984) Ispol'zovanie kavitacii v tekhnologicheskikh processakh [The use of cavitation in technological processes]. K.: Vishcha shkola. Izd-vo pri Kiev. Un-te, 68. [In Russian].

11. Vitenko T.M. (2009) Hidrodinamichna kavitatsiia u masoobminnykh, khimichnykh i biolohichnykh protsesakh [Hydrodynamic cavitation in mass transfer, chemical and biological processes]. Ternopil: Vydavnytstvo TDTU im. I Puliuia. 224. [in Ukrainian].

12. Wong J.E., Muñiz D.B., Martínez G.C., Belmares R.E., Aguilar C.N. (2015) Ultrasound-assisted extraction of polyphenols from native plants in the Mexican desert. *Ultrason. Sonochem.* № 22. P. 474–481.

13. Agranat B.A., Dubrovin M.N., Havskij N.N., Eskin G.I. (1987) Osnovy fiziki i tekhniki ul'trazvuka [Fundamentals of physics and technology of ultrasound]. M.: Vysshaya shkola. 352 s. [in Ukrainian].

14. Sirotyuk M.G., Gavrilov L.R. (2008) Akusticheskaya kavitaciya [Acoustic cavitation]. M.: Nauka. 271. [In Russian].

15. Moshaii A. and Sadighi-Bonabi R.(2004). Role of liquid compressional viscosity in the dynamics of a sonoluminescing bubble. *Phys. Rev. E*. V. 70. 29-36.

16. Luhovskiy O. F., Beryk I. M. (2010) Fizychna model ultrazvukovoho kavitatsiinoho vyluchennia pektynu z vtorynnoi roslynnoi syrovyny [Physical model of ultrasonic cavitation extraction of pectin from secondary vegetable raw materials]. *Visnyk natsionalnoho tekhnichnoho universytetu Ukrainy «Kyivskiy politekhnichnyi instytut» serii «Khimichna inzheneriia, ekolohiia ta resursozberezhennia»*. №1 (5). 25–30. [in Ukrainian].

17. Margulis M. A., Margulis I. M. (2007) Dinamika ansamblya puzyr'kov v kavitiruyushchei zhidkosti [Dynamics of an ensemble of bubbles in a cavitating liquid]. *ZHurnal fizicheskoy himii*. T.81. №12. 2290-2295. [In Russian].

18. SHestakov S. D. (2010) Mnogopuzyr'kovaya akusticheskaya kavitaciya: matematicheskaya model' i fizicheskoe podobie [Multi-bubble acoustic cavitation: mathematical



model and physical similarity]. *Elektronnyj zhurnal "Tekhnicheskaya akustika"*. №14. 16. [In Russian].

19. Bernyk I. (2016) Research parameters of ultrasound processing equipment dispersed in technological environment. *Motrol. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture*. Vol. 18. № 3. 3 – 13.

20. Luk'yanchenko M., Dzhelyal A., Strubalin A. (2013) Vliyanie tekhnologicheskikh parametrov na prochnost' razlichnykh vidov vyazhushchih pri ul'trazvukovoy obrabotke vodotverdykh suspenzij [Influence of technological parameters on the strength of various types of binders during ultrasonic treatment of water-solid suspensions]. *Motrol. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture*. Vol. 15. №5. 17–22. [In Russian].

21. Luhovskyi O. F., Bernyk I. M. (2016) Analiz metodiv vyznachennia shvydkosti rozpovsiudzhennia khvyl v kavitatsiinii oblasti ul'trazvukovoho polia [Analysis of methods for determining the speed of wave propagation in the cavitation region of the ultrasonic field]. *Visnyk NTU «KhPI», Seriya: Novi rishennia v suchasnykh tekhnolohiiakh*. № 18. 10–15. [in Ukrainian].

22. Du T., Huang Ch., Wang Y. A. (2016) Numerical Model for Evolution of Internal Structure of Cloud Cavitation. *ISROMAC-2016 (International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery)*. April. Hawaii, Honolulu. 10-15.

23. Hmelev, V. N., Knyazev A. N., Barsukov R. V., SHalunov A. V. (2001) Izmerenie parametrov tekhnologicheskikh sred, podvergaemykh vozdeystviyu ul'trazvukovykh kolebanij vysokoy intensivnosti [Measurement of parameters of technological media exposed to high-intensity ultrasonic vibrations]. *Izmereniya, avtomatizatsiya i modelirovanie v promyshlennykh i nauchnykh issledovaniyah: mezhvuzovskij sbornik*. 262-267. [In Russian].

24. Bernyk I. M., Luhovskyi O. F. (2014) Vstanovlennia osnovnykh parametriv vplyvu tekhnolohichnoho seredovyshcha na robochy protses ul'trazvukovoi kavitatsiinoi obrobky [Establishment of the basic parameters of influence of technological environment on working process of ultrasonic cavitation processing]. *Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh*. № 3(75). 121–126. [in Ukrainian].

25. Shirsath, S.R.; Sonawane, S.H.; Gogate, P.R. (2012) Intensification of extraction of natural products using ultrasonic irradiations. A review of current status. *Chem. Eng. Process. Process Intensif.* № 53. 10–23.

26. SHutilov V. A. (1980) Osnovy fiziki ul'trazvuka: ucheb. Posobie [Fundamentals of Ultrasound Physics]. L.: Izd-vo Leningr. un-ta. 280. [In Russian].

27. Dolinskij A. A., Ivanickij G. K. (2008) *Teplomassoobmen i gidrodinamika v parozhidkostnykh dispersnykh sredah* [Heat and mass transfer and hydrodynamics in vapor-liquid dispersed media]. Kiev: Nauk. dumka. 381. [In Russian].

28. Dolinskij A.A., Nakorchevskij A.I. (1997) Principy optimizatsii massoobmennykh tekhnologij na osnove metoda diskretno-impul'snogo vvoda energii [Optimization principles of mass transfer technologies based on the method of discrete-pulse energy input]. *Promyshlennaya teplotekhnika*. Т. 19. № 6. 5 – 9. [In Russian].

#### ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ ПИЩЕВОГО СЫРЬЯ

*Исследованы возможности повышения эффективности процессов ультразвукового технологического действия при обработке пищевого сырья путем учета их реологических свойств. Доказана необходимость определения классификационных признаков пищевых сред, которые являются определяющими для процессов их обработки и отражают изменение в процессе ультразвуковой обработки. Установлено, что к ключевым признакам относятся режим нагрузки на излучатель, физические характеристики и условия воздействия на излучатель. Выявлено, что по режиму нагрузки на излучатель существенное влияние на процесс обработки оказывают акустически неограниченные среды с постоянными и изменяющимися физическими параметрами и габаритами. Эффективность ввода колебаний в акустически неограниченные и ограниченные среды обеспечивается методом согласования величины входного сопротивления с источником колебаний и с волноводной системой. Выявлены физические характеристики пищевых сред, условия воздействия на излучатель. Классификационные признаки отражают основные ключевые аспекты повышения эффективности ультразвукового технологического действия при обработке пищевого сырья, связанных с оценкой распространения волн в среде и взаимодействием этих волн с излучателем. Установлено, что модель Кельвина-Фойгта является одной из достоверных, отражающих проявление реологических свойств среды в условиях ультразвуковой кавитационной обработки. Учитывая преобразование ультразвуковой энергии,*



определены основные этапы процесса. Установлены зависимости амплитуды звукового давления от толщины слоя обрабатываемой среды жидкости с учетом вязкости. А также зависимости радиуса кавитационного пузыря от амплитуды звукового давления, от толщины слоя жидкости. Исследовано волновое сопротивление среды и получены аналитические зависимости для определения необходимой интенсивности обработки технологических сред.

**Ключевые слова:** модель, реологические свойства, жидкостно-дисперсные среды, кавитация, упругость, вязкость, скорость, давление, волновое сопротивление, ультразвук.

### INCREASING THE ULTRASONIC TECHNOLOGICAL ACTION EFFICIENCY IN THE FOOD RAW MATERIALS PROCESSING

*The increase of ultrasonic technological action efficiency at food raw materials processing by taking into account their rheological properties is investigated. We have proved the need to determine the classification characteristics of food media, which are crucial for their processing and reflect the change in ultrasonic treatment. The mode of loading on the emitter, physical characteristics and conditions of exposure to the emitter are among the key features. It was found that acoustically unlimited media with constant and variable physical parameters with constant and variable dimensions have a significant impact on*

*the processing. The efficiency of the oscillations in acoustically unlimited and limited environments is ensured by matching the value of the input resistance with the source of oscillations and with the waveguide system. Physical characteristics of food media, conditions of influence on the emitter are revealed. The identified classification features reflect the main key aspects of improving the efficiency of ultrasonic technological action in the food raw materials processing, which are related to the assessment of the waves' propagation in the media and the interaction of these waves with the emitter. It is established that the Kelvin-Voigt model is one of the most reliable, it reflects the certain rheological properties of the medium in the conditions of ultrasonic cavitation treatment. Taking into account the conversion of ultrasonic energy, the main stages of the process are identified. The dependences of the amplitude of the sound pressure on the thickness of the fluid treatment layer are established, taking into account the viscosity of the liquid. The dependences of the radius of the cavitation bubble on the amplitude of the sound pressure and the thickness of the liquid layer are revealed. The wave resistance of the medium is studied and analytical dependences are obtained to determine the intensity of the technological process by which the increase of the efficiency of the processes of ultrasonic technological action in the food raw materials processing is realized.*

**Keywords:** model, rheological properties, liquid-dispersed media, cavitation, elasticity, viscosity, velocity, pressure, wave resistance.

### Відомості про авторів

**Берник Ірина Миколаївна** – доктор технічних наук, доцент, завідувач кафедри харчових технологій і мікробіології Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21021, Україна, +380975133073, [iryna\\_bernyk@ukr.net](mailto:iryna_bernyk@ukr.net), <https://orcid.org/0000-0002-1367-3058>).

**Берник Ирина Николаевна** – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедры пищевых технологий и микробиологии Винницкого национального аграрного университета (ул. Солнечная, 3, г. Винница, 21008, Украина, +380975133073, [iryna\\_bernyk@ukr.net](mailto:iryna_bernyk@ukr.net), <https://orcid.org/0000-0002-1367-3058>).

**Bernyk Iryna** – D-r of Sciences, Technics, Associate Professor, Department of Food Technology and Microbiology, Vinnytsia National Agrarian University (3, Sonychna St., Vinnytsia, 21008, Ukraine +380975133073, [iryna\\_bernyk@ukr.net](mailto:iryna_bernyk@ukr.net), <https://orcid.org/0000-0002-1367-3058>).