



## Модельовання технологічних процесів

УДК 66.084.8

О.Ф. Луговський, д.т.н., професор. Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут»

І.М. Берник, к.т.н., доцент. Вінницький національний аграрний університет

### ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ДОЦІЛЬНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ УЛЬТРАЗВУКОВИХ КАВІТАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСАХ

**АНОТАЦІЯ.** Розглянуто теоретичні засади енергетичного впливу ультразвукового поля на технологічні середовища, що проявляються у фізико-хімічних ефектах. Основну результуючу дію на рідинні середовища має акустична кавітація і пов'язані з нею явища – звукокапілярний ефект та хімічні реакції.

**АННОТАЦИЯ.** Рассмотрены теоретические основы энергетического воздействия ультразвукового поля на технологические среды, проявляющиеся в физико-химических эффектах. Основное влияние на жидкие среды имеет акустическая кавитация и связанные с ней явления – звукокапиллярный эффект и химические реакции.

**ANNOTATION.** Theoretical basis of the energy impact of ultrasonic field on the technological environment, which manifest themselves in physical and chemical effects. The main resulting effect on the liquid medium is acoustic cavitation and related phenomena - zvukokapilyarnyy effect and chemical reactions.

**Актуальність досліджень.** Сучасні технологічні процеси обробки технологічних середовищ хімічної, харчової, фармацевтичної та інших переробних галузей нерозривно пов'язані з використанням енергії ультразвукового поля різної інтенсивності [1–3]. Акустичне поле створює направлену дію пружних коливань на технологічне середовище, які спричиняють фізико-хімічні ефекти. Розвиток і використання ультразвукових технологій дозволяє інтенсифікувати технологічні процеси, підвищити ступінь використання сировини, змінити вихідні властивості матеріалу, створити нові речовини і середовища, забезпечити екологічність та безпечність виробництва [4–6].

**Мета досліджень.** При виконанні досліджень параметрів акустичного поля ультразвукового діапазону застосовані основні положення класичної теорії акустики, теоретичний та експериментальний аналіз здійснено шляхом оцінки параметрів енергетичної дії ультразвукового поля на технологічні середовища.

**Методика та результати досліджень.** Ефективність використання ультразвукових технологій у технологічних процесах обумовлена специфікою впливу коливань на середовища, що проявляються у фізико-хімічних ефектах та їх взаємодією (рис. 1).

Ультразвукові коливання проявляються в імпульсній енергетичній дії. Енергія звукової хвилі у процесі коливань періодично – з періодом  $T/2$  – переходить з потенційної (в ділянці стискання) у кінетичну (рух частинок та утворення зони зрідження). Оскільки частинки коливаються навколо свого положення рівноваги, то в класичному хвильовому процесі відбувається передача енергії без перенесення речовини [7].

Величина середньої кінетичної енергії в одиниці об'єму з урахуванням середнього значення квадрата косинуса (рівний  $1/2$ ):

$$\overline{E_k} = \frac{1}{4} \rho \omega^2 A^2, \quad (1)$$

де  $\overline{E_k}$  – середня кінетична енергія в одиниці об'єму;  $\rho$  – густина середовища, у якому розповсюджується хвиля;  $\omega$  – колова частота ультразвукових коливань;  $A$  – амплітуда зміщення частинки.

Середнє значення потенційної енергії – виражається тією ж величиною. Звідси, середня енергія звукової хвилі в одиниці об'єму:

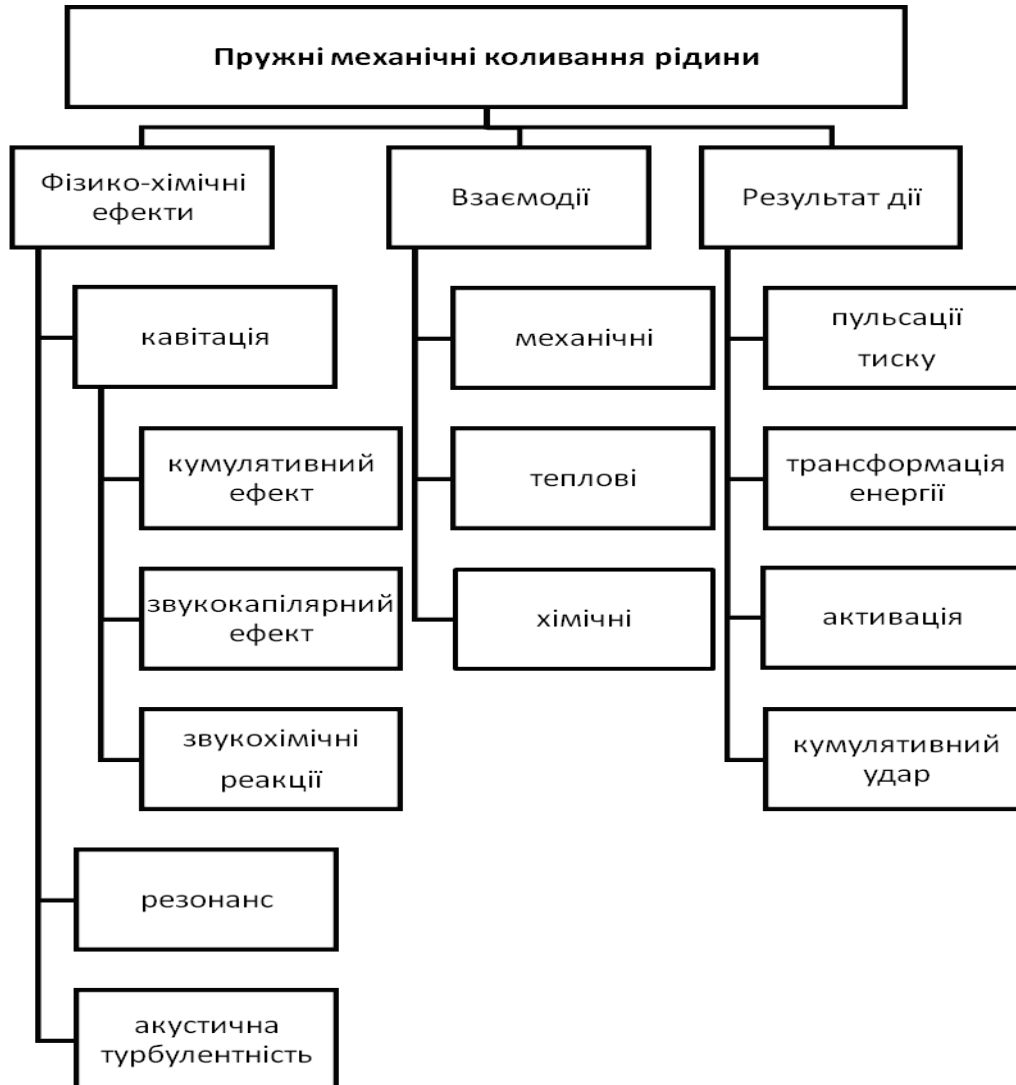


Рисунок 1. Схема дії акустичних коливань на хіміко-технологічну систему.

$$\overline{E_{\Sigma}} = \overline{E_k} + \overline{E_{\Pi}} \quad (2)$$

$$\overline{E_{\Sigma}} = 2\pi^2 \rho f^2 A^2 = \frac{1}{2} \rho U^2,$$

де  $\overline{E_{\Sigma}}$  – повна середня енергія звукової хвилі в одиниці об'єму;  $\overline{E_{\Pi}}$  – середнє значення потенційної енергії в одиниці об'єму;  $f$  – частота ультразвукових коливань;  $U$  – амплітуда коливальної швидкості.

Акустичне поле характеризується енергетичним параметром – інтенсивністю випромінювання:

$$I = \overline{E_{\Sigma}} c = \frac{1}{2} \rho c \omega^2 A^2 = \frac{1}{2} \rho c U^2 = \frac{p_a^2}{2\rho c}, \quad (3)$$

де  $c$  – швидкість звуку у середовищі;  $P_a$  – звуковий тиск, що створюється звуковим полем.

Ультразвукова хвиля інтенсивністю  $I_k$  спричиняє розвиток кавітації. При цьому вона визначається деякою пороговою величиною ( $I_{п} = 1\text{--}2 \text{ Вт/см}^2$ ), нижче якої із зародків вже не утворюються кавітаційні бульбашки.

*Особливості ультразвукової кавітації.* Найбільш успішне використання ультразвуку пов'язане з обробкою рідинних середовищ, оскільки саме в них виникає явище – ультразвукової кавітації, що є ефективним механізмом концентрації енергії звукової хвилі низької щільності у високу щільність енергії, яка зумовлена пульсаціями та захопуванням кавітаційних бульбашок [8–10].

Кавітація, тобто розрив рідини, є результатом змінного тиску в об'ємі, що створює джерело ультразвукових коливань. Утворення кавітаційних бульбашок відбувається у фазі розрідження за наявності зародків кавітації (нерозчинні гази, незмочуванні тверді частинки, парогазові бульбашки) [9]. Захопування їх відбувається у фазі стиснення. При цьому пара конденсується, а газ зазнає сильного адіабатичного стиснення. Пульсації кавітаційних бульбашок та їх захопування створюють у мікрооб'ємах інтенсивні мікротечії, ударні хвилі, кумулятивні струмені та локальні температури.

Створити ультразвукову кавітацію можуть лише зародки певного інтервалу розмірів [8]. Мінімальний початковий радіус  $R_{\text{ед}}$  визначається із залежності:

$$R_{\text{ед}} = \sqrt{3}R_0 \left[ \frac{R_0}{2\sigma} \left( p_0 + \frac{2\sigma}{R_0} \right) \right]^{1/2}, \quad (4)$$

де  $p_0$  – гідростатичний тиск;  $R_0$  – початковий радіус бульбашки;  $\sigma$  – коефіцієнт поверхневого натягу.

Максимальний радіус, за якого відбувається захопування бульбашок, відповідає резонансному розміру  $R_{\text{рез}}$ :

$$(2\pi f)^2 = \frac{3\gamma_a}{\rho_p R_{\text{рез}}^2} \left( p_a + \frac{2\sigma}{R_{\text{рез}}} \right), \quad (5)$$

де  $R_{\text{рез}}$  – резонансний розмір зародка;  $\gamma_a$  – показник адіабати;  $\rho_p$  – густина незбуреної рідини.

Зростання частоти коливань сприяє зменшенню  $R_{\text{рез}}$ , а отже і розмірів бульбашок, які можуть захопуватися. Тому при  $R_0 < R < R_{\text{рез}}$  спостерігається пульсація бульбашок.

Нелінійне диференціальне рівняння, що описує модель сферично-симетричної пульсації газової порожнини радіусом  $r = R(t)$  у плоскій звуковій хвилі, набуде вигляду [9]:

$$R \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left( \frac{dR}{dt} \right)^2 + \frac{1}{\rho} [p_{\infty} - p(R)] = 0, \quad (6)$$

де  $R = R(t)$  – радіус кавітаційної бульбашки;  $p(R)$  – тиск на поверхні бульбашки;

$p_{\infty}$  – тиск на безмежній відстані від бульбашки;  $t$  – час.

У реальних умовах розвиненої кавітації бульбашки взаємодіють одна з одною у процесі пульсації. Тому необхідно враховувати тиск  $p_{\text{кав}}$ , що генерується всіма кавітаційними бульбашками:

$$R \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left( \frac{dR}{dt} \right)^2 + \frac{1}{\rho} \left[ p_{\infty} - p_n - p_a + p_{\text{кав}} + \frac{2\sigma}{R} + \frac{4\mu}{R} \frac{dR}{dt} - \left( p_{\infty} + \frac{2\sigma}{R_0} \right) \left( \frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma} \right] = 0, \quad (7)$$

де  $p_n$  – тиск пари;  $\mu$  – коефіцієнт в'язкості рідини;  $\gamma$  – показник політропи.

Швидкість захлопування порожнини знайдемо при рішенні диференційного рівняння Релея:

$$\frac{dR}{dt} = \left[ \frac{2p_0}{3\rho_0} \left( \frac{R_0^3}{R^3} - 1 \right) \right]^{1/2}, \quad (8)$$

Інтегруючи рівняння, отримуємо формулу Релея для часу захлопування  $t$  в полі тиску  $p$  при  $R \rightarrow 0$ :

$$t = - \int_R^0 \left[ \frac{2}{3} \frac{p_0}{\rho_p} \left( \frac{R_0^3}{R^3} - 1 \right) \right]^{-1/2} dr, \quad t = 0,915 R_0 \left( \frac{\rho_0}{p_p} \right)^{1/2}. \quad (9)$$

У кавітаційній області безперервно відбувається процес збільшення кількості кавітаційних бульбашок та їх коагуляція. Протягом декількох десятків періодів коливань розвивається стабільна кавітаційна область, зародками кавітації якої є частинки бульбашок, що захлопнулися в попередній період [11].

Кавітаційні бульбашки при розширенні випромінюють сферичні хвилі, які при значних швидкостях захлопування можуть перейти в ударні [12].

Поведінка кавітаційної області та окремої кавітаційної бульбашки залежить від багатьох факторів, зокрема від розподілу зародків кавітації, пульсацій та мікропотоків, акустичних властивостей середовища, наявності “твердої” стінки та низка інших.

Сьогодні накопичено значну кількість експериментальних досліджень з вивчення ультразвукової кавітації [13], які покладені в основу теорії поведінки рідини під впливом інтенсивних ультразвукових коливань. Використання швидкісних відеокамер дало можливість розглянути утворення та розвиток кавітаційної бульбашки за різних умов.

Динаміка кавітаційної бульбашки у безмежній рідині свідчить про існування лише однієї ударної хвилі (рис. 2) [14].

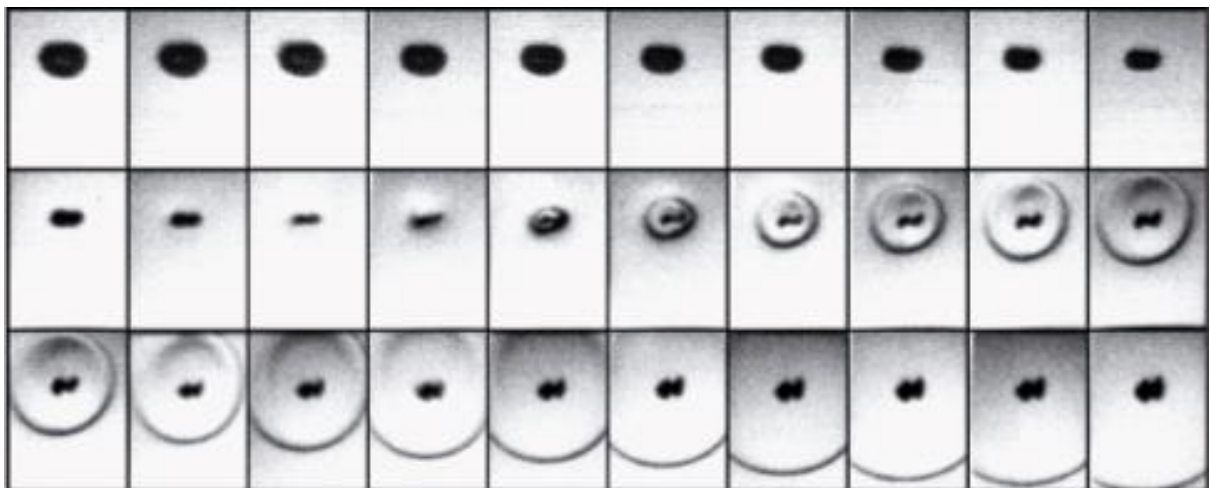


Рисунок 2. Захлопування кавітаційної бульбашки в безмежному об'ємі рідинних середовищ.

Наявність та взаємодія двох кавітаційних бульбашок призводить до утворення зустрічних струменів (рис. 3) [15].

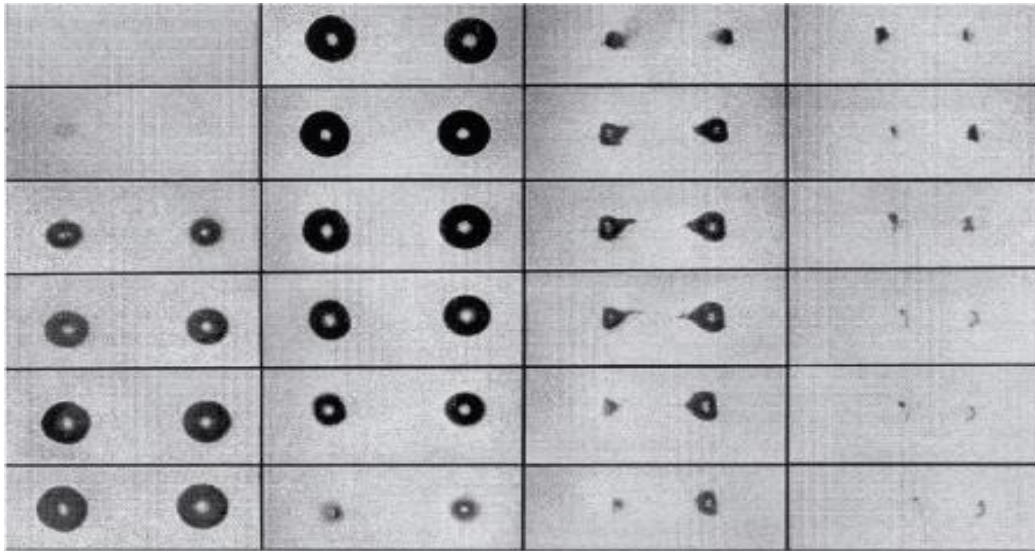


Рисунок 3. Взаємний вплив бульбашок.

Вплив на форму та динаміку захлопування кавітаційної бульбашки має також “тверда стінка”, що знаходиться на відстані  $\zeta < 4$ . За таких умов бульбашка має несиметричне захлопування та викликає порядку 3 ударних хвиль (рис. 4) [16].

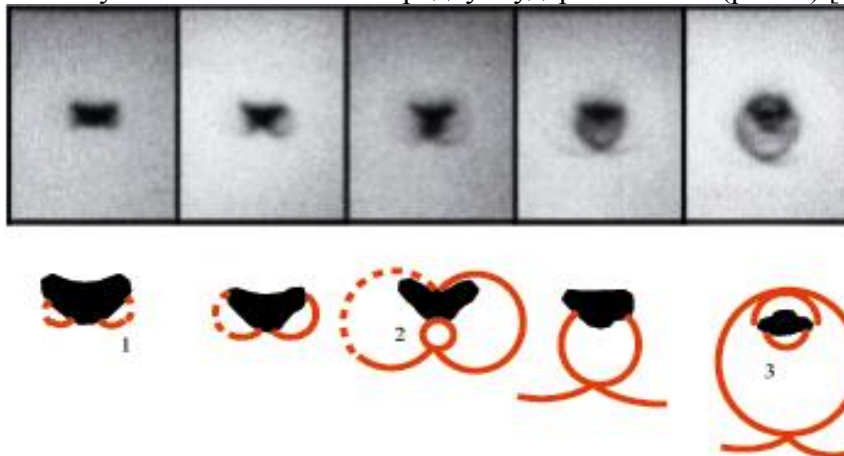


Рисунок 4. Несферичне захлопування кавітаційної бульбашки.

За умови, що захлопування відбувається у щілині між твердими стінками, величина щілини між якими близька до діаметра бульбашки, спостерігається утворення кумулятивних струменів, направлених паралельно “твердих” поверхонь [13].

Дослідження кавітації проводять, використовуючи прямі та непрямі методи. До прямих належать візуальні та акустичні, до непрямих – фотоелектричні, хімічні, акустичні, механічні та технологічні [17].

Тестом швидкої оцінки ефективності ультразвукової кавітації є використання тонкої алюмінієвої фольги (непрямий механічний метод), яку розміщують вздовж розповсюдження хвилі деформації (рис. 5) [18, 19]. Кавітаційна ерозія призводить до швидкого руйнування фольги.

*Фізико-хімічні явища, пов'язані з ультразвуковою кавітацією*

*Звукокапілярний ефект.* Збудження ультразвукових коливань, за наявності капілярів, формує стаціонарний потік рідини у ньому, тобто виникає так званий звукокапілярний ефект, який яскраво проявляється при кавітаційному режимі [20].

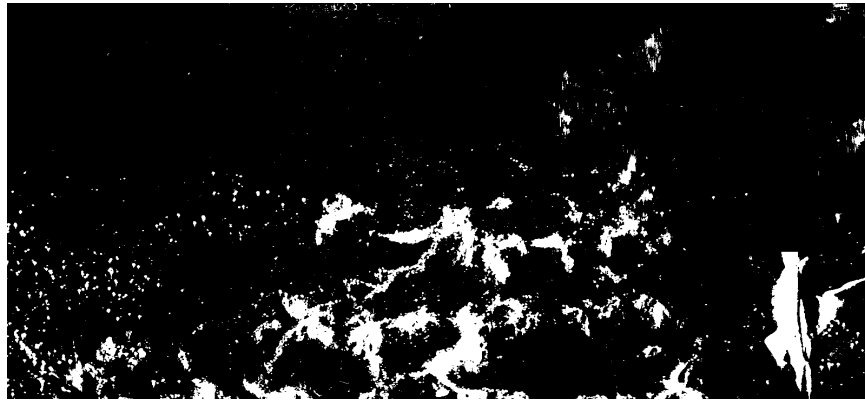


Рисунок 5. Кавітаційне руйнування алюмінієвої фольги при захопуванні бульбашок.

Заповнення капілярів рідиною пов'язано зі зниженням в'язкості рідини у зв'язку з розігріванням, підніманням рідини в капілярі та формуванням стаціонарного потоку [21].

Формування стаціонарного потоку рідини в капілярі пов'язано з тиском, що створений кавітаційними бульбашками при захопуванні. Кавітаційні бульбашки мають несферичну форму, оскільки захопування відбувається за наявності "твердої" стінки та існує градієнт тиску навколишнього середовища [22].

Нетрадиційним підходом є розгляд кавітаційного кластеру, як пасивної акустичної мікронерівності, на яку з боку ультразвукового поля діє сила, що направляє її у капіляр [23]. У каналі можливе несферичне захопування порожнини. Схема процесів, що розвиваються у капілярі розглянуто на основі експериментів (рис. 6). Порівняння розрахункових значень величин – потужності, що переноситься потоком через одиницю перетину капіляру  $J_k$ , та інтенсивності ультразвукового поля  $J$ , а також відповідних експериментальних даних показує, що  $J_k$  перевищує значення  $J$  більше ніж на порядок, що й забезпечує створення потоку.

Таким чином було зроблено висновок, що кавітаційне середовище концентрує акустичну енергію поля, а звукокапілярна сила направляє кластер у канал капіляра. Сконцентрована акустична енергія трансформується в енергію потоку рідини. Періодичне формування кластера забезпечує стаціонарний потік, а повне захопування бульбашок – його суцільність. Обумовлені властивості звукокапілярного ефекту покладені в основу методу визначення швидкості звуку в кавітуючій рідині.

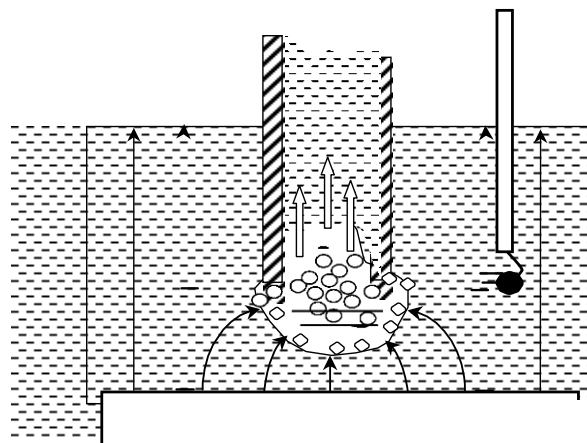


Рисунок 6. Концентрація та перетворення енергії ультразвукового поля у зрізі капіляра.

Тиск у кавітуючій рідині має пульсуючий характер із середнім значенням, яке перевищує значення гідростатичного тиску [24]. Тоді сила, що діє на капіляр, спрямована в той же бік, що і швидкість течії рідини в каналі.



Явище звукокапілярного ефекту набуло широкого практичного застосування для реалізації процесів від очищення до диспергування.

**Звукохімічні реакції.** Дія кавітації на водні розчини призводить до збудження, іонізації та дисоціації молекул води та газів у середині кавітаційної бульбашки. Наявні у середовищі гази беруть участь у передачі енергії збудження та інших процесах. Як результат є розщеплення молекул води в кавітаційних бульбашках та зміна її фізико-хімічних властивостей: підвищення рН, електропровідності, збільшення кількості вільних іонів та активних радикалів, структуризації та активації [25]. Звук при цьому діє лише на воду незалежно від природи розчинених речовин.

Сумарну схему розщеплення молекул води можна подати у вигляді:



Акустичні коливання спричиняють хімічну дію на речовину. Заслужують на увагу реакції за участю макромолекул, наприклад, деструкція молекул полімерів та ініційована нею полімеризація, для яких важливі не тільки кавітаційні процеси та пов'язані з ними ударні хвилі та кумулятивні струмені, але й механічні хвилі, що виникають при проходженні ультразвуку через розчин полімеру та руйнують макромолекули. За відсутності кавітації макромолекули не встигають переміщуватися разом з молекулами розчинника, коли у розчині поширюються ультразвукові хвилі. У цьому випадку значну роль можуть відігравати високі градієнти швидкостей та прискорень, які на 2–3 порядки перевищують градієнт звукової хвилі, що достатньо для розриву клітинних оболонок, мембран, розриву біомакромолекул.

Хімічна дія ультразвуку під час кавітації за походженням тепловою або електричною.

#### **Висновки.**

Визначено напрямок інтенсифікації технологічних процесів переробних виробництв, за рахунок використання ультразвукових коливань різних інтенсивностей.

Здійснено класифікацію ефектів та результатів їх взаємодії, що виникають у хіміко-технологічних системах під дією ультразвуку.

Застосовано у якості основного критерію досліджуваних ефектів середнє значення енергії, що передається до технологічного середовища, та встановлено порогова величина енергії.

Головним чинником інтенсифікації технологічних процесів при накладанні ультразвукового поля є дискретно-імпульсне підведення енергії, яке базується на використанні фізико-хімічних ефектів, що виникають в газорідних середовищах при швидкій зміні зовнішнього тиску.

#### *Література*

1. Луговской А.Ф., Чухраев Н.В. Ультразвуковая кавитация в современных технологиях.- К.: Видавничо-поліграфічний центр "Київський університет", 2007.-244 с.
2. Кисилев Е.С. Интенсификация процессов механической обработки использованием энергии ультразвукового поля. – Ульяновск: УлГТУ, 2003. – 186 с. – ISBN 5–89146
3. Хмелёв В.Н. Применение ультразвука высокой интенсивности в промышленности / В.Н. Хмелев, А.Н. Слывин, Р.В. Барсуков, С.Н. Цыганок, А.В. Шалунов – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. Ун-та, 2010. – 203 с.
4. Федоткин И.М. Физико-математические основы интенсификации процессов и аппаратов пищевой и химической технологии. – Кишнев: Штиинца, 1987.
5. Луговський О.Ф. Фізична модель ультразвукового кавітаційного вилучення пектину з вторинної рослинної сировини / О.Ф. Луговський, І.М. Берник // Вісник національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» серія «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження». – 2010. – №1 (5) – С. 25-30.
6. Эльпинер И. Е. Ультразвук. Физико-химическое и биологическое действие / И.Е. Эльпинер. – М.: Физматгиз, 1969. – 420 с.



7. Воробьев Е.А. Теория ультразвуковых колебаний как основа построения и применения технических средств получения информации. Учеб. пособ. / Е.А. Воробьев. – СПб.: СПбУАП, 2002. – 54 с.: ил. – Библиогр.: С. 52.
8. Пирсол И. Кавитация / И. Пирсол. – М.: Мир, 1975. – 95 с.
9. Кнэпп Р. Кавитация / Р. Кнэпп, Дж. Дейли, Ф. Хэммит. – М.: Мир, 1974. – 668 с.
10. Федоткин И.М. Использование кавитации в технологических процессах / И.М. Федоткин, А.Ф. Немчин. – Киев: Вища школа, 1984. – 68 с.
11. Розенберг Л.Д. Кавитационная область // Мощные ультразвуковые поля / Л.Д. Розенберг; [под ред. Л.Д. Розенберга]. – М.: Наука, 1968. – Ч. 6. – С. 221 – 266.
12. Агранат Б. А. Физические основы технологических процессов, протекающих в жидкой фазе с воздействием ультразвука / Б. А. Агранат. – М.: Машиностроение, 1969. – 237 с.
13. Кувшинов Г.И. Акустическая кавитация у твердых поверхностей / Г.И. Кувшинов, П.П. Прохоренко; [под ред. В. К. Кедринского]. – Мн.: Навука і тэхніка, 1990. – 112 с.
14. Ohl C. D.. Cavitation bubble collapse studied at 20 million frames per second / C. D. Ohl, A. Philipp, W. Lauterborn // Ann. Physik. – 1995. – № 4. – P. 26–34.
15. Technologieanalyzse Von der Kavitation zur Sonotechnologie, Technologiefrüherkennung (Band 32). – Hrsg.: VDI-Technologiezentrum im Auftrag des BMBF, 2000 / – ISSN 1436-5928.
16. Linbau O. Stoßwellen im Kollaps von Kavitationsblasen: Ein vertracktes Ausbreitungs-Szenario / O. Linbau, W. Lauterborn // A. Sill, Ed., Fortschritte der Akustik, Oldenburg. DEGA. V. Oldenburg, March 2000. – P. 694–695.
17. Колесников А.Е. Ультразвуковые измерения. – 2-е изд., перераб. и доп / А. Е. Колесников. – М.: Изд.-во стандартов, 1982. – 248 с., ил.
18. Technologieanalyzse Von der Kavitation zur Sonotechnologie, Technologiefrüherkennung (Band 32) Hrsg.: VDI-Technologiezentrum im Auftrag des BMBF. – 2000. – ISSN 1436-5928.
19. Луговской А.Ф. Повышение эффективности ультразвуковой кавитационной очистки в ваннах малого объема / А.Ф. Луговской, А.В. Мовчанюк, В.И. Чорный, М.Ф. Омелич, И.Н. Берник // Промислова гідраліка і пневматика. – 2007. – № 1 (15). – С. 40–43.
20. Прохоренко П.П. К вопросу о воздействии ультразвука на жидкость в капилляре / П.П. Прохоренко, Н. В. Дежкунов // Весці АН БССР. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 1976. – № 2. – С. 122–124.
21. Прохоренко П. П. Ультразвуковой капиллярный эффект / П.П. Прохоренко, Н.В. Дежкунов, Г.Е. Коновалов. – Минск: Навука і тэхніка, 1981. – 135 с.
22. Митчел Т. М. Несимметричное схлопывание кавитационного пузырька / Т.М. Митчел, Ф.Ж. Хэммит // Теоретические основы инженерных расчетов. – 1973. – № 1. – С. 98–107.
23. Розина Е.Ю. Звукокапиллярный метод определения скорости звука в кавитирующей жидкости / Е. Ю. Розина // Акустичний вісник. – 2005. – Том 8. – №4. – С. 51–58. – Бібліогр.: с. 58.
24. Санкин Г. Н. Сила, действующая на цилиндр при ультразвуковой кавитации / Г. Н. Санкин, Н. В. Малых // Журнал технической физики. – 2005. – Том 75. – Вып. 7. – С. 101–105. – Библиогр.: с. 105.
25. Маргулис М.А. Звукохимические реакции и сонолюминисценция / М.А. Маргулис. – М.: Химия, 1986. – 288 с.