

**Міністерство освіти і науки України  
Київський національний університет  
будівництва і архітектури  
Академія будівництва України**

**XVIII Міжнародна науково-технічна конференція  
«Вібрації в техніці та технологіях»**

**23-25 жовтня 2019 року**

**конференція присвячена  
55-річчю факультету автоматизації і  
інформаційних технологій**

**Київ 2019**

## **ПРОГРАМНИЙ КОМІТЕТ**

### **Голова програмного комітету:**

**Куліков Петро Мусійович** – д-р. екон. наук, професор, ректор Київського національного університету будівництва і архітектури

### **Заступники голови програмного комітету:**

**Плоский Віталій Олексійович** – д.т.н., професор, проректор з наукової роботи Київського національного університету будівництва і архітектури

**Баженов Віктор Андрійович** – д.т.н., професор, завідувач кафедри будівельної механіки Київського національного університету будівництва і архітектури

**Назаренко Іван Іванович** – д.т.н., професор, завідувач кафедри машин і обладнання технологічних процесів Київського національного університету будівництва і архітектури

### **Члени програмного комітету:**

**Бобир М.І.** – д.т.н., професор, Київ

**Генрик С.**, професор, директор Представництва «Польська Академія Наук» у м. Київ, Польща

**Гордєєв А.І.** – д.т.н., професор, Хмельницький

**Данильченко Ю.М.** – д.т.н., професор, Київ

**Зіньковський А.П.** – д.т.н., професор, Київ

**Ємельянова І.А.**, д.т.н., професор, Харків

**Іскович–Лотоцький Р.Д.**– д.т.н., професор, Вінниця

**Ковров А.В.**, к.т.н., професор, Одеса

**Круль Казимеж**, професор, Польща, Радом

**Кузьо І.В.** – д.т.н., професор, Львів

**Ланець О.С.** – д.т.н., професор, Львів

**Ловейкін В.С.** – д.т.н., професор, Київ

**Луговський О.Ф.** – д.т.н., професор, Київ

**Маслов О.Г.**, д.т.н., професор, Кременчук

**Максименко О.Н.**, професор, Білорусія, Могильов

**Меламир Гашич**, професор, Сербія, Кралево

**Надугий В.П.**, д.т.н., професор, Дніпро

**Нестеренко М.П.**, д.т.н., професор, Полтава

**Оніщенко В.О.**, д.е.н., професор, Полтава

**Паламарчук І.П.**, д.т.н., професор, Київ

**Петраков Ю.В.**, професор, Київ

**Поліщук Л.К.**, д.т.н., професор, Вінниця

**Савіцький М.В.**, д.т.н., професор, Дніпро

**Сальвінський Юзеф**, професор, Польща, Краків

**Стіп-Рековські Міхал**, професор, Польща, Бидгощ

**Струтинський В.Б.**, д.т.н., професор, Київ

**Стоцько З.А.**, д.т.н., професор, Львів

**Фаренюк Г.Г.**, д.т.н., професор, Київ

**Франчук В.П.**, д.т.н., професор, Дніпро

**Харченко Є.В.**, д.т.н., професор, Львів

**Хмара Л.А.**, д.т.н., професор, Дніпро

**Шатохін В.М.**, д.т.н., професор, Харків  
**Яровий А.А.**, д.т.н., професор, Вінниця  
**Яхно О.М.**, д.т.н., професор, Київ

## **ОРГАНІЗАЦІЙНИЙ КОМІТЕТ**

### **Голова оргкомітету:**

**Назаренко Іван Іванович**, д.т.н, професор, зав. кафедри машин і обладнання технологічних процесів КНУБА

### **Заступник голови оргкомітету:**

**Яковенко Валерій Борисович**, д.т.н, професор, професор кафедри машин і обладнання технологічних процесів КНУБА

**Гайдайчук Віктор Васильович**, д.т.н, професор, зав. кафедри теоретичної механіки КНУБА

### **Члени оргкомітету:**

**Делембовський Максим Михайлович**, к.т.н., доцент

**Дєдов Олег Павлович**, к.т.н., доцент

**Дьяченко Олександр Сергійович**, асистент

**Клименко Микола Олександрович**, к.т.н., доцент

**Лесько Віталій Іванович**, доцент

**Міщук Євген Олександрович**, к.т.н., доцент

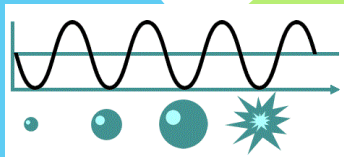
**Орищенко Сергій Вікторович**, к.т.н., доцент

**Свідерський Анатолій Тофілійович**, к.т.н., професор

### **Секретар конференції:**

**Ручинський Микола Миколайович**, к.т.н., професор

## ІНТЕНСИФІКАЦІЯ ПРОЦЕСІВ ОБРОБКИ ТЕХНОЛОГІЧНИХ СЕРЕДОВИЩ АКУСТИЧНОЮ КАВІТАЦІЄЮ



І. М. БЕРНИК, к. т. н., доцент,  
ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ  
УНІВЕРСИТЕТ

Серед існуючих технологій обробки середовищ, до яких відноситься: диспергування, емульгування, гомогенізація, дегазація і інші процеси, кавітаційна технологія займає чільне місце. Фізичні явища, що виникають в процесі реалізації кавітації, характеризуються широкою гамою різних ефектів (слайд 2). Ідея роботи (слайд 3) полягає у використанні потенційних можливостей активізації ефективного протікання процесів кавітації на основі синергії системи:

"К - ТС      ТС - Г",

де, К- кавітатор, ТС- техн. середовище, Г - газ

Для реалізації ідеї висловлена робоча гіпотеза: досягнення інтенсифікації встановлення режимів і параметрів, що відповідають максимальному отриманню необхідної енергії за умов мінімального опору середовища на всіх стадіях його обробки. Ця умова досягається прийнятою фізичною моделлю, яка у математичних рівняннях з достовірною для реальних умов протікання процесів зародження бульбашок, їх розвитку, утворення кавітаційної області бульбашок максимального об'єму та стадії їх схлопування реалізується за виконанням наступних критеріїв (слайд 4):

$$K_o = \frac{dV}{dt} \rightarrow \max ; (1)$$

$$K_e = \frac{dE}{dt} \rightarrow \min. (2)$$

Тут  $K_o$  і  $K_e$  – критерій об'єму, що являє собою визначення кавітаційної області бульбашок та критерій енергії, яка витрачається на протікання акустичної обробки технологічного середовища;  $dV$  – об'єм кавітаційної області бульбашок, що схлопуються;  $dE$  – енергія, яка витрачається на протікання акустичної обробки технологічного середовища;  $dt$  – час протікання акустичної обробки технологічного середовища. Критерії (1) і (2) є вихідною інформацією для розробки передумов досліджень і представляють сутність інтенсифікації. Для розробки алгоритму досліджень були визначені акустичні параметри та параметри середовища, які є факторами впливу на ефективність обробки технологічних

середовищ Основні параметри робочого процесу акустичної кавітаційної обробки робочих середовищ можна за певною умовністю розділити на три групи: силові, енергетичні та власне середовища (слайд 5).

Визначені структурно – механічні та реологічні властивості технологічного середовища складають структурну модель, що представлена в алгоритмі досліджень (слайд 6). Наступні три етапи алгоритму визначають розподіл зон і областей розвиненої кавітації з урахуванням зміни фізичних властивостей оброблюваного дисперсного середовища. При цьому важливим аспектом є врахування тих параметрів, що входять в рівняння руху як кавітатора так і середовища. Зазвичай це пружні, інерційні та дисипативні параметри, які представляються або в дискретному або в розподіленому вигляді. В більшості робіт, які підлягали аналізу, засвідчують, що технологічне середовище в процесі акустичної обробки представляється, як правило, деякою приєднаною масою до маси кавітаційного апарату. Разом з тим, зміна властивостей та параметрів технологічного середовища в процесі його обробки є доказаним фактом. Отже такий підхід якщо і можна використати, то тільки в рамках тих параметрів та характеристик, в яких були проведені дослідження. Тобто таке припущення не є коректною передумовою. Другою особливістю виконаних раніше робіт є роздільне дослідження динаміки акустичного апарату та рух середовища, як окремої системи. Таке припущення не дає повної картини процесу кавітаційної обробки з точки зору встановлення взаємовпливу апарату і середовища. Практично більшість моделей, що були розглянуті в процесі оцінки їхніх переваг та недоліків, застосовують лінійні коливання бульбашки із сферичною поверхнею без урахування в'язкості. Зазвичай, такі параметри процесу як резонансна частота визначаються для окремої бульбашки з подальшим врахуванням кавітаційного об'єму. Ми вважаємо, що необхідно систему «акустичний апарат – технологічне середовище» розглядати єдиною структурованою системою із урахуванням взаємодії основних елементів ультразвукової технологічної системи (слайд 7). Важливим аспектом в дослідженні цієї системи є прийняття фізичної моделі, як акустичного апарату так і технологічного середовища. Загально відомо, що будь яке тіло в хвильовому процесі проявляє в тій чи іншій ступені властивостями, якими є в'язкість, пластичність і пружність. Саме ці властивості, в об'єднаному або окремо і формують фізичну модель.

За частото залежною гіпотезою зміни в'язкості залежність між напруженням  $\sigma$  і деформацією  $\varepsilon$  має вигляд (слайд 9).

$$\sigma = E\varepsilon + \eta\dot{\varepsilon}, \quad (3)$$

де  $\eta$  – коефіцієнт, що враховує в'язкі властивості;  $E$  – модуль пружності;  $\dot{\varepsilon}$  - швидкість деформації. Залежність (3) відрізняється від звичайного пружного тіла, застосованого раніше в деяких роботах як закону Гука у вигляді  $\sigma = E\varepsilon$ , врахуванням дисипативної складової, яка є функцією швидкості деформації  $\dot{\varepsilon}$ . Хвильове рівняння пружно - в'язкого середовища (4) має вигляд :

$$\frac{\partial^2 x}{\partial t^2} = \frac{E}{\rho} \frac{\partial^2 x}{\partial z^2} + \frac{\eta}{\rho} \frac{\partial^3 x}{\partial x^2 \partial t} \quad (4)$$

Рішенням рівняння (4) (слайд 10) є функція :

$$x = A_0 e^{\pm \alpha z + i(\pm kz - \omega t)} \quad (5)$$

У рішенні (5) прийняті такі позначення:  $x$ - переміщення шару оброблювального середовища з амплітудою коливань  $A_0$ ;  $\alpha$  - коефіцієнт згасання хвилі в середовищі, яке знаходиться під дією акустичного апарату;  $z$  - координата за напрямком якої розповсюджується хвиля.

$k$  - хвильове число:

$$(k = \omega / c) \quad (6)$$

Найважливішими характеристиками рівняння (4) та його рішення (5) являються модуль  $E$  пружності середовища в конкретній стадії його обробки та коефіцієнт опору  $\eta$ , який і визначає в'язку властивість технологічного середовища. Підстановкою рішення (5) в (4) із врахуванням (3) після нескладних перетворень отримаємо вираз для визначення коефіцієнту опору (слайд11)

$$\eta = 2E \frac{\alpha}{c(k^2 - \alpha^2)}. \quad (7)$$

На величину коефіцієнта опору  $\eta$  має вплив коефіцієнт згасання хвилі  $\alpha$  в середовищі, яке знаходиться під дією акустичного апарату, хвильове число  $k$  ( $k = \omega / c$ ) та модуль пружності середовища  $E$ , який визначається за залежністю:

$$E = \frac{\rho \omega^2 (k^2 - \alpha^2)}{\sqrt{(k^4 - \alpha^4)^2 + 4k^2 \alpha^2 (\alpha^2 + k^2)^2}} \quad (8)$$

Серед важливих параметрів являється тиск, що суттєво впливає на процес протікання акустичної обробки технологічного середовища(слайд12). Як слідує із отриманих формул 9 та 11, всі параметри, що впливають на пошук умов інтенсифікації, входять в ці формули і натомість виникає задача дослідження саме контактного тиску. Нижче будуть приведені саме ці дослідження. А на слайді13 приведена залежність між напруженням і деформацією за гіпотезою, коли коефіцієнт опору не залежить від частоти(слайд13):

$$\sigma = E\varepsilon + iE\varepsilon\gamma, \quad (12)$$

де  $i$  – мніма одиниця, яка вказує на поворот вектора дисипативної складової сили  $E\varepsilon\gamma$  відносно пружної  $E\varepsilon$  на кут  $\pi/2$ ;  $\gamma$  – коефіцієнт опору, який оцінює рівень енергії, що розсіюється в середовищі за один цикл коливань. Тут використана комплексна форма, яка дає можливість більш спрощено представити аналітичні залежності. Рішенням рівняння 13 є комплексна хвильова функція 14(слайд14). В аналогічній послідовності отримані вирази для визначення коефіцієнта поглинання енергії  $\alpha$ , хвильового числа  $\omega/c$  та дійсного і мнімого модулів пружності, що приведені на слайді15.Хочу звернути увагу на аналітичну залежність для визначення тиску(слайд16).Аналіз отриманих аналітичних залежностей для визначення тисків засвідчив, що впливовими параметрами технологічного середовища являються швидкість розповсюдження хвиль в середовищі та коефіцієнт згасання цих хвиль.Одним із найважливіших параметром, від якого залежить вплив пружно – інерційних характеристик технологічного середовища на протікання кавітаційного процесу є швидкість розповсюдження хвиль. Існує ціла низка методів, які мають певні переваги та недоліки(слайд 17). На основі оцінки та аналізу низки методів було вибрано метод визначення швидкість розповсюдження хвиль на основі яких розроблена схема

установки(слайд 18). Від генератора імпульсів 1 до випромінювача 2 посиляється електричний сигнал фіксованої ультразвукової частоти. Датчик, який в даному випадку є випромінювачем і приймачем, перетворює надійшовши сигнал в пружні коливання тієї ж частоти (зворотний п'єзоефект), який проходять через шар технологічного середовища. Приймач перетворює пружні коливання ультразвукової частоти в електричний сигнал тієї ж частоти (прямий п'єзоефект) і подає сигнал на екран комп'ютера 5. На екрані комп'ютера відображені генераторний імпульс і сигнал, що пройшов через трубку із технологічним середовищем. Відстань між ними  $h$  характеризує час  $t$  проходження пружних коливань від джерела до відбивача і назад. Отже, швидкість розповсюдження хвиль в технологічному середовищі визначається за формулою:

$$c = h / t$$

На слайдах 19 і 20 приведені характерні віброграми для вимірів акустичних параметрів різних технологічних середовищ, обробкою яких визначено швидкість розповсюдження хвиль (Слайд 21)

В аналітичних дослідженнях використовували дві схеми системи «акустичний перетворювач – технологічне середовище» із розташуванням акустичного апарату знизу і зверху(слайд22).

Досліджено розповсюдження акустичної хвилі по осі  $X$  від апарату до границі з середовищем з акустичним опором  $Z_a$  (слайд 23). А в середовищі на границі з апаратом по цій же осі  $X$ , внаслідок дії цього опору, виникає хвильовий опір  $Z_c$ . Цілком очевидно, що окрім хвилі, яка передається в середовище, на межі контакту апарату з середовищем виникає хвиля, яка рухається в зворотному напрямку. Таким чином, утворюється складне хвильове поле. В результаті досліджень отримані аналітичні залежності для визначення хвильового опору Також досліджено систем (слайд 24)у, коли між апаратом і середовищем встановлено компенсатор та визначено його геометричні параметри, за якими забезпечується ефективний режим протікання технологічного процесу.ВИЗНАЧЕНІ РАЦІОНАЛЬНІ ЗНАЧЕННЯ РАДІУСА КАВІТАЦІЙНОЇ БУЛЬБАШКИ В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД РЕОЛОГІЧНИХ ТА АКУСТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ(слайд 25), які використані при дослідженні розподілу тиску по довжині розповсюдження хвилі для різних середовищ та швидкостей розповсюдження хвиль( слайди 26.27,28). Як слідує із графіків (слайди 29,30), коефіцієнти опору як пружно – інерційні так і дисипативні суттєво впливають на процесрозповсюдження хвиль, а значить і процес зародження, розвитку та захопування бульбашок активного об'єму середовища.

#### ВИСНОВКИ.

1.Виявлено вплив реологічних властивостей технологічних середовищ на процеси утворення, розвитку та захопування кавітаційних бульбашок.

2.Знання пружно – інерційного та дисипативного опору технологічного середовища є необхідною умовою для визначення раціональних параметрів, які дозволяють значно інтенсифікувати процес зародження та розвитку кавітації.