

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ІНСТИТУТ ГІДРОМЕХАНІКИ



На правах рукопису  
УДК 532.528:534.1:622.22.01

МАНЬКО Іван Карпович

АВТОКОЛИВАННЯ, ВИКЛИКАНІ КАВПАЦІЄЮ У МІСЦЕВИХ ГІДРАВЛІЧНИХ  
ОПІРАХ, ТА ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ У ТЕХНІЦІ.

Спеціальність 05.14.07 - механіка рідин, газу та плазми.

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук.

КИЇВ 1996

№ 35, 281

Дисертацією в рукопис.

Робота виконана у Інституті технічної механіки Національної Академії Наук України.

Науковий керівник -

академік НАН України,  
доктор технічних наук, професор

Пилипенко Віктор Васильович

Офіційні опоненти -

доктор технічних наук, професор  
Савченко Юрій Миколайович,  
кандидат фізико-математичних наук  
Семенов Юрій Асафійович

Провідна організація - конструкторське бюро "Південне"

Захист відбудеться "26" вересня 1996 р. у "14" годин на засіданні спеціалізованої Вченої Ради Д 01. 04. 01 при Інституті гідромеханіки НАН України /252057, Київ, ул.Желябова 8 /4. З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Інституту гідромеханіки НАН України.

Автореферат розісланий "6" серпня 1996 р.

Вчений секретар спеціалізованої Вченої Ради доктор технічних наук



Кріль С.І.

ЛННБ України ім. В. Стефаника  
00753709 (V)

1.1. Актуальність теми досліджень. У хімічній та харчовій промисловостях у ряді обмінних процесів, як метод їх інтенсифікації, використовують накладення пульсацій на безперервний потік рідини. У вугільній та металургійній промисловостях основними шляхами підвищення ефективності гідровідбою вугілля та гідрозбиву окалини є застосування високих постійних або короткочасних імпульсних напірів води. При цьому, у ряді випадків, збільшення частоти коливань справляє більш активний вплив на процес зруйнування твердого матеріалу, змішування або розпилення рідини, чим збільшення амплітуди.

Для накладення пульсацій на безперервний потік рідини та одержання пульсуючих струменів використовують об'ємні, механічні або повітряні пульсатори. Недоліком всіх перерахованих типів пульсаторів є наявність рухомих або обертальних частин. Це ускладнює конструкцію, знижує експлуатаційну надійність пульсатора, вимагає значних витрат енергії та обмежує частоту пульсацій. Усунення перерахованих вад відомих типів пульсаторів, що застосовуються для інтенсифікації різних технологічних процесів, робить актуальною задачу пошуку засобів створення пульсацій за рахунок використання енергії середовища, що протікає. Істотна заслуга у вивченні автоколивань у гідравлічних системах, зумовлених наявністю кавітаційних каверн у шнековідцентрових насосах та місцевих гідроопірах типу трубки Вентурі, належить В.В.Пилипенко та В.А.Задонцеву. Ними запропонований механізм низькочастотних кавітаційних автоколивань тиску та витрати рідини у гідравлічній системі з круглою трубкою Вентурі. При випробуваннях трубки Вентурі з кутлом дифузора  $\beta = 10^\circ 20'$  практично на всіх режимах на основній гармоніці низькочастотних кавітаційних автоколивань спостерігались накладені коливання з більш високою частотою. Дослідження високочастотних коливань, виникаючих при кавітаційних

течіях рідини у місцевих гідроопірах, з метою їх використання для перетворення безперервного потоку рідини у пульсуючий, яким присвячена дисертація, стають вельми актуальними.

1.2. Метою даної роботи являється: дослідження автоколивань рідини в гідравлічній системі, зумовлених кавітаційними явищами у місцевих гідроопірах; розробка генераторів коливань тиску рідини та установок для інтенсифікації різних технологічних процесів.

Ця мета передбачає рішення таких конкретних задач:

- аналіз основних робіт, присвячених дослідженням кавітаційних течій рідини у місцевих гідроопірах; узагальнення результатів досліджень віброакустичних характеристик кавітаційної течії у місцевих гідроопірах; розгляд існуючих теорій кавітаційної течії у звукоізольовуючому каналі;
- установити можливість одержання періодичних коливань тиску у потоці рідини при кавітаційних режимах течії у місцевих гідроопірах та визначити можливі діапазони частот та амплітуд цих коливань;
- дослідити експериментально зі застосуванням швидкісної кінозйомки фізичну картину течії рідини у місцевих гідроопірах на режимах з кавітацією, вплив їх геометричних, режимних параметрів та форми проточного каналу на частоту та амплітуду періодичних коливань тиску, а також змінення амплітуди коливань тиску у потоці рідини по довжині трубопроводу за місцевим гідроопіром;
- виявити умови виникнення та межі існування розвинених кавітаційних течій, при яких у гідравлічній системі залежно від форми проточного каналу місцевого гідроопіру виникають періодичні коливання потоку рідини;
- установити причинно-слідчі зв'язки виникнення періодичних коливань тиску у потоці рідини при кавітаційних течіях у місцевих гідроопірах та одержати формули для розрахунку частоти та амплітуди цих коливань;
- показати можливість використання кавітаційних режимів течії у місцевих гідроопірах для перетворення стаціонарного потоку рідини у пульсуючий, дослідити параметри кавітаційних пульсуючих струменів рідини;
- розробити пристрої для створення у потоці рідини періодичних коливань тиску, з метою інтенсифікації різних технологічних процесів.

**1.3. Предметом дослідження** являється в'язка трьохрозмірна течія рідини у місцевих гідроопірах на кавітаційних режимах течії.

**1.4. Наукова новина роботи** полягає у такому:

- істотно розширені представлення про природу формування нестационарних течій рідини у системі з місцевими гідравлічними опорами;
- для деяких типів місцевих гідроопірів, що відрізняються формою проточних каналів, встановлені діапазони режимних параметрів, у яких у

гідравлічній системі, в якій містяться ці опіри, можуть виникнути високочастотні автоколивання рідини;

- виявлена форма проточного каналу місцевого гідроопіру, при якій у потоці рідини виникають періодичні коливання з розмахом коливної величини тиску у декілька разів перевищуючим значення тиску, що установився на вході у гідроопір; встановлена фізична картина та причинно-слідчі зв'язки виникнення періодичних коливань тиску з аномально високими значеннями розмаху коливної величини тиску, що принциповим образом міняє раніше відомі теоретичні представлення про механізм кавітаційних автоколивань рідини у гідравлічній системі та про величину тиску, виникаючого при зхлопуванні кавітаційної каверни у потоці рідини, на різних відстанях від центру зхлопування;

- встановлено, що високочастотні періодичні коливання тиску у рідині зумовлені особливою формою кавітаційної течії у місцевих гідроопірах, особливістю яких є те, що при течії рідини через осьосиметричний гідроопір відбувається періодичне утворення, зріст до максимальних розмірів, відповідних даному режиму течії, та відрив частини кавітаційної каверни, а потім віднесення та зхлопування частини каверни, що відірвалась, у потоці рідини;

- одержані експериментальні залежності частоти, розмаху коливної величини тиску, довжини кавітаційної каверни та відстані від перерізу відриву до місця зхлопування каверни від режимних параметрів течії у соплах Вентурі з різними кутами дифузора;

- запропоновані формули для розрахунку частоти та розмаху коливної величини тиску високочастотних кавітаційних коливань у гідравлічній системі через режимні та геометричні параметри сопла Вентурі, дозволяючі одержати задовільне узгодження експериментальних та розрахункових значень цих параметрів;

- експериментально доведено, що шляхом організації у проточному каналі осьосиметричного місцевого гідроопіру течії у режимі періодично-зривної кавітації можна перетворити стаціонарний потік рідини у пульсуючий; одержані експериментальні залежності значень параметрів високочастотно

го пульсуючого струменя по його довжині та проведено їх порівняння з аналогічними параметрами стаціонарного струменя.

**1.5. Практична цінність роботи** полягає у тому що:

- дані практичні рекомендації для використання гідродинамічної кавітації у місцевих гідроопірах для перетворення протікаючого квазістаціонарного турбулентного потоку у пульсуючий, удосконалення різних апаратів та устаткування у харчовій, хімічній, добувній та перероблюючій промисловостях, у яких для інтенсифікації різних технологічних процесів використовують пульсуючі потоки рідини;
- розроблений ряд оригінальних кавітаційних генераторів коливань тиску рідини у широкому діапазоні частот і амплітуд, які не містять в собі рухомих та обертальних частин і не вимагають підводу додаткової енергії;
- розроблені та пройшли промислові випробування пристрої та устаткування для інтенсифікації різних технологічних процесів.

**1.6. Апробація роботи.** Основні результати роботи доповідались та були схвалені на: 13-й Всесоюзній нараді по гідроавтоматиці у Калужській філії МВТУ ім. Н.Е.Баумана, м. Калуга, травень 1974 р.; 1 (травень 1974 р.), 2 (травень 1976 р.), 3 (травень 1980 р.), 4 (жовтень 1983 р.) міжвідомчих нарадах по проблемі, "Кавітаційні автоколивання та динаміка гідросистем" м. Дніпропетровськ; на наукових семінарах відділу гідромеханічних систем літальних апаратів Інституту технічної механіки НАН України; на засіданнях Вченої ради Інституту технічної механіки НАН України.

**1.7. Публікації.** Основні результати роботи опубліковані у 12 статтях та у 26 технічних рішеннях, захищених авторськими свідоцтвами на винаходи.

**1.8. Об'єм та структура роботи.** Основний зміст роботи висловлено на 135 сторінках машинописного тексту, складеного з вступу, чотирьох глав, висновку. Загальний об'єм дисертації - 269 сторінок, включаючи 128 малюнків на 113 сторінках, 4 таблиці, 120 найменувань літературних джерел на 12 сторінках, додаток на 7 сторінках.

**1.9. Зміст роботи.** У вступі обгрунтована актуальність теми досліджень, визначені мета та задачі роботи, показані наукова новина та практична цінність отриманих результатів.

В першій главі розглянуті та проаналізовані результати досліджень кавітаційних течій рідини у місцевих гідроопірах, особливості їх роботи у режимі кавітації. Розглянуті існуючі теорії кавітаційної течії у звужуючо-розширювальнім каналі. Обґрунтована можливість одержання коливань потоку рідини при кавітаційних режимах течії у місцевих гідроопірах та розглянуті області застосування кавітаційних ефектів у корисних цілях.

У другій главі приведені результати експериментальних досліджень високочастотних кавітаційних автоколивань у гідравлічній системі з кавітуючими місцевими гідравлічними опірами. Дослідження проводились на спеціально розробленій установці [3] при постійних значеннях тиску на вході у місцевий гідравлічний опір  $\bar{P}_1 = 0,6 - 5,1$  МПа на режимах, що відрізняються ступенем розвитку кавітації. Для характеристики ступеню розвитку кавітації використовується критеріальний параметр кавітації для умов режиму, що установився і який уявляє собою відношення різниці повного тиску на виході з місцевого гідроопіру  $\bar{P}_2$  та тиску пружності насичених парів  $P_s$  до швидкісного напору, визначеному по швидкості струменя рідини у критичному перерізі 
$$\tau = \frac{\bar{P}_2 - P_s}{\gamma G^2},$$
 де  $\tau$  - параметр кавітації;  $\gamma$  - питома вага рідини;  $G$  - секундна вагова витрата рідини;  $g$  - прискорення сили ваги;  $\mu$  - коефіцієнт витрати місцевого гідроопіру;  $F_w$  - прохідна площа вузького перерізу місцевого гідроопіру.

Слід відзначити, що параметр кавітації чисельно приблизно дорівнює відношенню тисків  $\bar{P}_2 / \bar{P}_1$ .

У якості об'єктів досліджень були обрані нормальні дискові діафрагми з отвором, концентричним осі потоку, товсті діафрагми з прямокутними та округленими кромками на вході при відношенні площі отвору діа-

фрагми до площі поперечного перерізу трубопровода  $m = (d/D)^2 = 0,01 - 0,128$  [7], а також сопла Вентурі, що відрізняються кутами розкриття дифузора  $\beta$ , діаметром вузької ділянки  $d_{\text{в}}$  та формою проточної частини.

У процесі досліджень було встановлено, що у гідравлічній системі з місцевим гідроопіром у визначеному діапазоні значень відношення тисків на виході  $\bar{P}_2$  до тиску на вході у нього  $\bar{P}_1$  виникають автоколивання рідини.

По результатах випробувань одержані залежності частоти  $f$  та розмаху коливальної величини тиску  $\Delta P_2$  у трубопроводі за місцевим гідроопіром від відношення установлених значень тисків  $\bar{P}_2 / \bar{P}_1$ .

Аналіз результатів випробувань показав, що у гідравлічній системі за діафрагмою автоколивання існують у діапазоні відношення  $\bar{P}_2 / \bar{P}_1 = 0,02 - 0,8$ . Зі збільшенням відношення  $\bar{P}_2 / \bar{P}_1$  частота коливань збільшується від 100 до 1000 Гц практично по лінійному закону. Розмах коливальної величини тиску зі збільшенням відношення  $\bar{P}_2 / \bar{P}_1$  зменшується. Максимальні значення  $\Delta P_2$  не перевищують значення тиску  $\bar{P}_1$ .

Установлено, що частота кавітаційних автоколивань у гідравлічній системі, що включає перераховані конструкції діафрагм, у всьому діапазоні змінення параметра кавітації не залежить від тиску на вході і визначається відношенням площі отвору до площі трубопровода  $m = (d/D)^2$ . При цьому зі збільшенням значення  $m$  частота автоколивань плавно зменшується, а залежність розмаху коливальної величини тиску має максимум при  $m=0,05$ .

Особливу увагу приділено дослідженням автоколивань рідини у гідравлічній системі з соплами Вентурі, що являються класичними пристроями для вивчення явища кавітації у поточному середовищі. Геометричні характеристики випробовуваних сопел Вентурі приведені у таблиці 1. Діаметр вихідного перерізу дифузора сопла Вентурі та трубопровода за ним рівнявся  $D_1 = 0,06$  м.

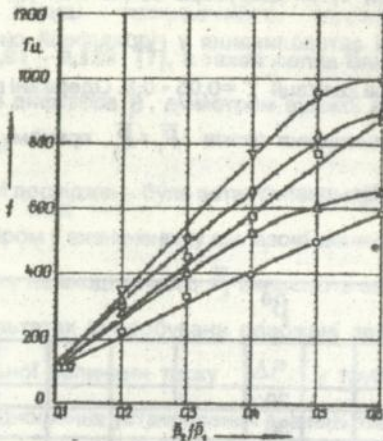
Було встановлено, що при кутах дифузора сопла Вентурі  $\beta = 10 - 30^\circ$  високочастотні кавітаційні автоколивання у гідравлічній системі існують у діапазоні значень параметра кавітації  $\tau = 0,05 - 0,8$ . Одержані практично лінійні залежності частоти від відношення тисків  $\bar{P}_2 / \bar{P}_1$ , причому зі збільшенням значення  $\bar{P}_2 / \bar{P}_1$  частота збільшується.

Таблиця 1.

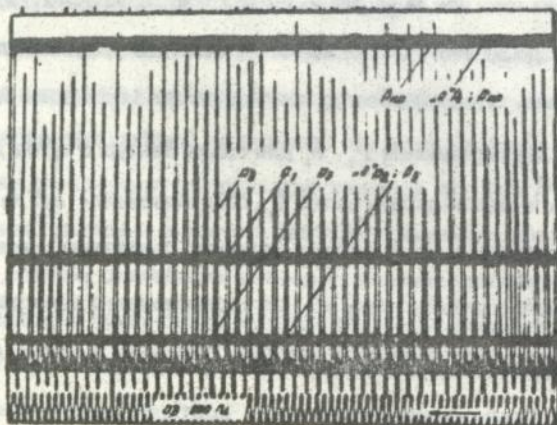
$d_{kp}$	$\beta^\circ$											
$M \cdot 10^{-3}$												
3,5						30						
7,0						30						
10,0			20									
14,0	10	20	16	20	25	30	40	45	60	80	90	120
21,0			20									

У діапазоні кутів дифузора  $\beta = 16 - 30^\circ$  при фіксованих значеннях параметра кавітації зі збільшенням тиску на вході у сопло частота коливань збільшується. Окрім того, при інших рівних умовах зі збільшенням кута дифузора сопла Вентурі з  $16^\circ$  до  $30^\circ$  частота кавітаційних автоколивань рідини збільшується пропорційно тангенсу кута дифузора. Як приклад на мал.1 приведені залежності частоти коливань від відношення  $\bar{P}_2 / \bar{P}_1$  для сопла Вентурі з кутом дифузора  $\beta = 30^\circ$  при різних тисках на вході у сопло  $\bar{P}_1$ . Слід відзначити, що за місцевим гідроопіром спостерігаються коливання ударного характеру, несиметричні відносно середнього значення тиску  $\bar{P}_1$ . Це наочно видно з представленої на мал.2 осцилограми запису тисків за соплом Вентурі з кутом дифузора  $\beta = 30^\circ$ .

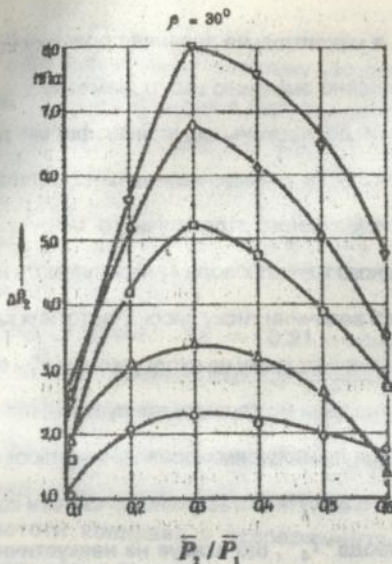
Залежності розмаху коливальної величини тиску  $\Delta P_2$  від відношення тисків  $\bar{P}_2 / \bar{P}_1$  при постійному тиску на вході у сопло Вентурі  $\bar{P}_1$  нелінійні та мають максимум при  $\bar{P}_2 / \bar{P}_1 = 0,3$ . При постійних значеннях



Мал.1. Залежність частоти кавітаційних коливань від відношення тисків  $\bar{P}_2/\bar{P}_1$  у гідравлічній системі за соплом Вентури з кутом дифузора  $\beta = 30^\circ$  для різних тисків на вході  $\bar{P}_1$ , МПа: ○ - 1; △ - 2; □ - 3; ◇ - 4; ▽ - 5.



Мал.2. Осцилограма тисків у гідравлічній системі за соплом Вентури з кутом дифузора  $\beta = 30^\circ$  при  $P_1 = 4,0$  МПа та  $P_2/P_1 = 0,2$ .



Мал.3. Залежність розмаху коливальної величини тиску від відношення тисків  $\bar{P}_2 / \bar{P}_1$  за соплом Вентурі з кутом дифузора  $\beta = 30^\circ$  для різних тисків  $\bar{P}_1$ , МПа: ○ - 1; △ - 2; □ - 3; ◇ - 4; ▽ - 5.

$\bar{P}_2 / \bar{P}_1$  зі збільшенням тиску  $\bar{P}_1$  розмах коливальної величини тиску також збільшується (див. мал.3). Максимальне значення  $\Delta P_2$  у діапазоні  $\beta = 10 - 30^\circ$  у 1,1 - 2,7 рази перевищує тиск, що установився  $\bar{P}_1$ .

Подальше збільшення кута дифузора сопла Вентурі приводить до звуження діапазону існування високочастотних кавітаційних коливань по параметру кавітації  $\tau$ , а максимальне значення розмаху коливальної величини тиску спостерігається при  $\tau = 0,1$ . При цьому частота коливань визначається тільки значенням параметра кавітації  $\tau$  і не залежить від тиску на вході  $\bar{P}_1$ .

По результатах випробувань було встановлено, що при постійних значеннях тиску на вході у сопло Вентурі  $\bar{P}_1$  і відношення тисків  $\bar{P}_2 / \bar{P}_1$  частота кавітаційних автоколивань обернено пропорційна зміненню діаметра

критичного перетину сопла, а максимальне значення розмаху коливальної величини тиску прямо пропорційно змінненню цього діаметру.

Приведені результати досліджень по впливу форми проточного каналу сопла Вентурі на частоту та розмах коливальної величини тиску. Показано, що величина зосередженого гідравлічного опору у вихідному трубопроводі та довжина вихідного трубопровода  $l_2$  не впливають на значення частоти та розмаху коливальної величини тиску високочастотних кавітаційних автоколивань при постійних значеннях тиску на вході у сопло  $\bar{P}_1$  і відношення тисків  $\bar{P}_2 / \bar{P}_1$ . Остання обставина дала можливість припустити, що виявлений новий вид коливань тиску рідини за місцевим гідравлічним опором, найбільш характерною особливістю яких є відсутність залежності частоти коливань від довжини вихідного трубопровода  $l_2$ , що вказує на неакустичну природу цих коливань.

Одержані залежності частоти автоколивань, що спостерігаються, від швидкості струменя рідини у критичному перетині сопла Вентурі  $v_c$  для різних значень параметра кавітації  $\tau$  та від осьової довжини кавітаційної каверни  $l_k$  показали, що частота автоколивань прямо пропорційна швидкості струменя рідини  $v_c$  та обернено пропорційна осьовій довжині кавітаційної каверни  $l_k$ . Швидкість струменя рідини у критичному перетині місцевого гідроопору визначалась з виразу

$$v_c = \frac{G}{\gamma \mu F_{kr}}$$

Осьова довжина кавітаційної каверни згідно теоретичної моделі низькочастотних кавітаційних автоколивань /див. Пилипенко В.В., Задонцев В.А. Про один механізм автоколивань у гідравлічній системі з кавітуючою трубою Вентурі. - Кавітац. автоколивання та динаміка гідравл. систем. - Київ: Наук.думка, 1976. - ч. 2. с. 93 - 103 / визначається по формулі:

$$l_k = \frac{r_{kr}}{tg(\beta/2)} \left( \sqrt{1 - \frac{\mu}{\sqrt{1-\tau}}} - 1 \right)^2$$

де:  $r_{kr}$  - радіус критичного перетину місцевого звуження. З урахуванням виразів для швидкості струменя рідини у критичному перетині та довжини кавітаційної каверни формула для частоти кавітаційних автоколивань, що спостерігаються, запишеться у наступному вигляді:

$$f = Sh_m \frac{tg(\beta/2) G}{r_{kr} \gamma \mu F_{kr} \sqrt{1 - \sqrt{1 - \tau}}} = Sh_m \sqrt{2 \rho (\bar{P}_1 - P_1)} \frac{tg(\beta/2)}{r_{kr} \sqrt{1 - \sqrt{1 - \tau}} - 1}$$

де:  $\rho$  - щільність рідини;  $Sh_m = 0,21$  - модифіковане число Струхалія /див.Сиомала Рао, Локшмана Рао, Сетхарамія. Вивчення кавітаційної ерозії методом трубки Вентурі та диска, що обертається. - Тр. Америк.-ва інж.мех., Сер. Д. -Теорет.основи інженерних розрахунків. - 1970- N5. - с.141-148/.

Спостерігається задовільне узгодження розрахованих по формулі значень частоти коливань з експериментальними, отриманими при випробуваннях сопел Вентурі з кутами дифузора  $\beta = 16-30^\circ$  у діапазоні значень параметра кавітації  $0,1 < \tau < 0,4$ . Запропонована формула визначення частоти високочастотних кавітаційних автоколивань при постійному значенні числа Струхалія застосовна у діапазоні кутів дифузора сопла Вентурі  $16^\circ < \beta < 45^\circ$ . При використанні отриманих у процесі досліджень залежностей числа Струхалія від параметра кавітації  $\tau$  [10] запропонована формула дає задовільне узгодження розрахункових значень частоти з експериментальними у діапазоні кутів дифузора сопла Вентурі  $16^\circ < \beta < 180^\circ$ .

Для спрощених інженерних розрахунків частоти високочастотних кавітаційних автоколивань у гідравлічній системі з соплом Вентурі з кутами дифузора  $\beta = 16-30^\circ$  запропонована формула у наступному вигляді:

$$f = 0,5 \tau \frac{v_c \cdot tg(\beta/2)}{r_{kr} \sqrt{\mu}}$$

Аналізом залежностей розмаху коливальної величини тиску при високочастотних кавітаційних автоколиваннях було встановлено, що його значення визначається тиском на вході  $\bar{P}_1$ , параметром кавітації  $\tau$ , кутом

дифузора  $\beta$  та відношенням діаметру вихідного перерізу дифузора сопла Вентурі до діаметру його критичного перетину  $\bar{D} = D_1 / r_c$ . З урахуванням цієї обставини запропонована емпірична формула для розрахунку розмаху коливальної величини тиску через геометричні та режимні параметри сопла Вентурі у вигляді рівняння:

$$\Delta P_2 = [a_0 \tau^4 \exp(a_1 \tau) \operatorname{tg}(\beta / 2)^{a_2} \exp[a_3 \operatorname{tg}(\beta / 2)] \bar{D}^{a_4}] \bar{P}_1.$$

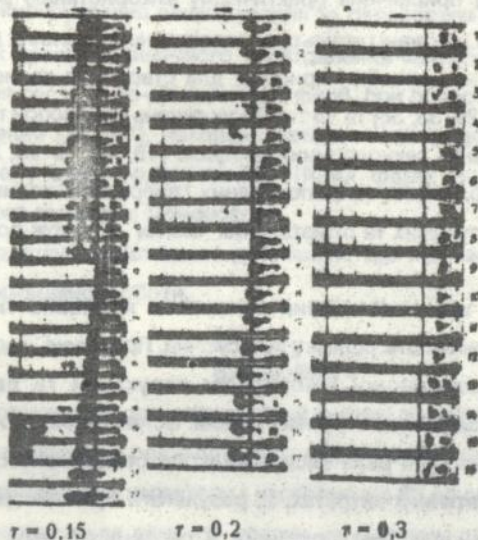
Запропонована формула дає задовільне узгодження експериментальних значень розмаху коливальної величини тиску з розрахунковими при наступних значеннях коефіцієнтів:

$a_0 = 0,37109^{10}$ ;  $a_1 = 1,4509$ ;  $a_2 = -5,1225$ ;  $a_3 = 13,079$ ;  $a_4 = -64,508$ ;  $a_5 = -1,5112$ . Але при кутах дифузора  $\beta \geq 45^\circ$  значення коефіцієнта  $a_0$  слід брати рівним  $a_0 = 8,73288$ .

У третій главі приведені результати візуальних досліджень з застосуванням швидкісної кінозйомки кавітаційних течій рідини у місцевих гідролінійних опірах. Візуальні дослідження дозволили установити фізичну картину кавітаційної течії, тип, стадії, форми кавітації у місцевих гідроопірах, природу спостережуваних високочастотних коливань рідини, а також визначити кількісно довжину дифузornoї частини кавітаційної каверни у соплі Вентурі та відстань від місця її відриву до місця зхлопування на різних режимах течії.

Осьова довжина дифузornoї частини кавітаційної каверни визначається значенням параметра кавітації  $\tau$  і при зменшенні значення цього параметра монотонно збільшується. Одержані експериментальні залежності максимальної осьової довжини кавітаційної каверни від параметра кавітації для сопел Вентурі з різними кутами розкриття дифузора.

При досягненні каверною на визначеному режимі максимальної довжини спостерігаються зворотні течії рідини вздовж стінки дифузора, які і відривають частину каверни. Частина каверни, що відірвалась, зноситься вниз по потоку та у зоні підвищеного тиску зхлопується, викликаючи імпульс тиску у трубопроводі.



Мал.4. Кінограми процесу кавітаційної течії у соплі Вентурі з кутом дифузора  $\beta = 30^\circ$  при різних значеннях параметра кавітації  $\tau$

При кутах дифузора сопла Вентурі на режимах розвиненої кавітаційної течії переріз відриву кавітаційної порожнини стає постійним і відповідає переходу циліндричної вузької ділянки у дифузор (див. мал. 4). Частота відриву та зхлопування дифузорної частини каверни стає строго періодичною і визначається параметром кавітації  $\tau$ . Частота відриву дифузорної частини каверни, визначена по кінограмі, відповідає частоті коливань тиску рідини, визначеної по осцилограмі на тому ж режимі по параметру кавітації  $\tau$ . Такий режим течії був названий режимом періодично-зривної кавітації.

По результатах дешифрування кінограм одержані експериментальні нелінійні залежності відстані  $l_{x_2}$  від перерізу відриву кавітаційної каверни до місця її зхлопування від відношення  $\bar{P}_1 / \bar{P}_2$  для сопел Вентурі з різними кутами дифузора  $\beta$ . Зі збільшенням відношення  $\bar{P}_1 / \bar{P}_2$  та зі збільшенням кута дифузора сопла відстань  $l_{x_2}$  монотонно зменшується. Місце зхлопування каверни знаходиться у центрі потоку рідини.

Четверта глава присвячена практичному використанню результатів досліджень у техніці. Одержані результати досліджень дозволили розробити 10 технічних рішень на способи і пристрої для створення коливань тиску рідини [13, 17, 18, 26-29, 33, 38] та 16 технічних рішень на способи та пристрої для інтенсифікації різних технологічних процесів [15, 16, 19-25, 30-32, 34-37]. Відзначною особливістю запропонованих генераторів коливань тиску рідини є відсутність рухомих та обертальних частин, а також додаткового джерела енергії.

Показано, що кавітаційний генератор коливань тиску води перетворює стаціонарний потік рідини у пульсуючий. Проведені дослідження зі застосуванням швидкісної кінозйомки структури та параметрів високочастотного пульсуючого струменя рідини. Встановлено, що швидкість пульсуючого струменя у 1,4 рази вище швидкості стаціонарного струменя при однакових енергетичних витратах. Ці результати були використані при розробці установки гідрозбиву окалини з гарячих заготовок металу пульсуючими струменями води [16, 21].

Установка гідрозбиву окалини пульсуючими струменями води успішно пройшла випробування та впроваджена у колесопрокатному цеху Викоунського металургійного заводу /м.Викса, Нижегородська обл./, у цеху гарячої прокатки тонкого листа заводу "Запорожсталь", на листопрокатних ставах "2000" Орсько-Халиловського /м.Орськ, Оренбурзької обл./ та Комунарського /м.Комунарськ, Луганської обл./ металургійних комбінатів. Впровадження установок дозволило зменшити брак металу по запресовуванні окалини у 2-5 разів.

На підприємстві п /я М-5647 /м.Москва / впроваджений генератор коливань рідкого теплоносія у кожухотрубному теплообміннику [14], що дозволив інтенсифікувати процес теплообміну.

Установка для миття трубопроводів пульсуючою рідиною [15] впроваджена на підприємстві "Звездочка" /м.Северодвинськ/, що дозволило поліпшити якість та скоротити час промивки опалювальних систем.

Пройшли успішно випробування способ буріння свердловин та пристрій для його здійснення [35]. Результати випробувань використані при розробці дослідних зразків гідродинамічних вібраторів бурових.

Пройшла успішно випробування та переведена у розряд дослідно-промислових зразків одиничного виготовлення кавітаційна установка для диспергування паст водно-дисперсійних фарб, при розробці якої використані технічні рішення [36, 37], захищені авторськими свідоцтвами. Установка встановлена у цеху водно-дисперсійних фарб Дніпропетровського лакофарбового заводу ім. Ломоносова.

У додатку представлені документи, що підтверджують практичну цінність дисертаційної роботи.

### ВИСНОВКИ

1. Встановлено, що у гідравлічній системі з місцевими гідроопірами у визначеному діапазоні режимних параметрів можуть виникнути періодичні імпульси тиску ударного характеру з частотою від 80 до декількох тисяч герц, які розповсюджуються вниз по потоку на відстань до декількох метрів, практично не затухаючи.

2. Одержані експериментальні залежності частоти та розмаху коливальної величини тиску від параметра кавітації  $\zeta$  для гідравлічних опірів з різною формою проточного каналу у діапазоні значень тиску, що установився на вході у нього,  $\bar{P}_1$  від 0,6 до 5,1 МПа.

3. Показано, що у гідравлічній системі, що включає нормальні дискові і діафрагми з циліндричною вузькою ділянкою, періодичні імпульси тиску існують у діапазоні значень параметра кавітації  $\zeta = 0,02 - 0,8$  з частотою від 100 до 1000 Гц. Максимальне значення розмаху коливальної величини тиску не перевищує тиску на вході.

4. У гідравлічній системі, що включає сопло Вентурі з циліндричною вузькою ділянкою та кутом дифузора  $\beta < 16^\circ$ , періодичні імпульси тиску виникають у діапазоні значень параметра кавітації від 0,1 до 0,8 з частотою від 600 до 1150 Гц. Максимальні значення розмаху коливальної величини тиску у 1,1 - 1,9 рази перевищують значення тиску, що установився на вході у сопло Вентурі.

5. Встановлено, що у гідравлічній системі, що включає сопло Вентурі з кутом дифузора від  $16^\circ$  до  $40^\circ$ , періодичні імпульси тиску існують в

діапазоні значень параметра кавітації від 0, 1 до 0, 7. Максимальне значення розмаху коливальної величини тиску у 1,5 - 2,7 рази перевищує тиск, що установився на вході у сопло.

6. Показано, що у гідравлічній системі, що включає сопло Вентурі, з куту дифузора  $\beta > 40^\circ$ , періодичні імпульси тиску існують у діапазоні значень параметра кавітації від 0,02 до 0,4.

7. Встановлено, що геометричні та режимні параметри сопла Вентурі надають істотний вплив на значення частоти та розмаху коливальної величини тиску.

8. Одержані розрахункові формули для частоти та розмаху коливальної величини тиску періодичних імпульсів через режимні та геометричні параметри сопла Вентурі. Встановлені найбільш сприятливі умови, при яких у гідравлічній системі з місцевими опорами виникають високочастотні періодичні імпульси тиску.

9. Встановлено, що природа високочастотних періодичних імпульсів тиску у гідравлічній системі зумовлена виникненням у осьосиметричному місцевому гідроопірі режиму періодично-зривної кавітації. Одержані експериментальні залежності осьової довжини кавітаційної каверни від параметра кавітації для сопел Вентурі з різними кутами дифузора.

10. Показано, що при реалізації режиму періодично-зривної кавітації у місцевому гідроопірі стаціонарний потік рідини перетворюється у пульсуючий. Одержані експериментальні залежності швидкості порції пульсуючого струменя по його довжині. Встановлено, що швидкість високочастотного пульсуючого струменя у 1,4 рази вище швидкості стаціонарного струменя при однакових вхідних параметрах потоку рідини.

11. На основі результатів досліджень розроблені принципово нові конструкції генераторів коливань тиску рідини, відзначною особливістю яких є відсутність рухомих та обертальних частин. Розроблені способи та пристрої для інтенсифікації різних технологічних процесів.

**Публикації.** Основні результати дисертації опубліковані у роботах:

1. Пилипенко В.В., Дрозд В.А., Довготько Н.И., Задонцев В.А., Манько И.К. Некоторые результаты экспериментальных исследований

автоколебаний в гидравлической системе с кавитирующей трубкой Вентури //Ракет. двигатели: Тр. постоянно действующего науч.-техн. семинара.- Днепропетровск: Изд.-во ДГУ, 1973.-Вып.4.-С.24-28.

2. Пилипенко В.В., Задонцев В.А., Манько И.К., Довготько Н.И. О высокочастотных колебаниях давления и расхода в гидравлической системе за кавитирующей трубкой Вентури //Материалы XIII совещания по гидравлической автоматике.- Калуга, 1974.- С.199-201.

3. Пилипенко В.В., Задонцев В.А., Манько И.К., Довготько Н.И. Исследование высокочастотных автоколебаний в гидравлической системе за кавитирующей трубкой Вентури //Кавитац. колебания в насосных системах.- Киев: Наук.думка, 1976.- Ч.2.- С.104-113.

4. Манько И.К. Визуальные исследования кавитационных автоколебаний в гидравлической системе с прозрачной трубкой Вентури // Там же.- С.113-118.

5. Манько И.К. Влияние угла диффузора трубки Вентури на частоту и уровень максимальных значений давления высокочастотных кавитационных автоколебаний // Кавитац. колебания в насосных системах.- Киев: Наук.думка, 1977.- С.34-39.

6. Пилипенко В.В. Манько И.К. Экспериментальное распределение длины кавитационной каверны и ее зависимости от угла диффузора трубки Вентури и режима ее работы //Там же.- С.39-43.

7. Манько И.К. Некоторые результаты экспериментального исследований кавитационных автоколебаний в гидравлической системе за дисковой диафрагмой //Там же.- С.43-47.

8. Манько И.К. О коэффициенте расхода трубки Вентури с углом диффузора 20 и 30° //Рабочие процессы в шнеко-центробежных насосах.- Киев: Наук. думка, 1979.- С.101-103.

9. Манько И.К. Распространение волн давления по длине трубопровода при низкочастотных кавитационных автоколебаниях, генерируемых трубкой Вентури // Там же.- С.103-107.

10. Манько И.К. Шепелев А.П. К расчету частоты высокочастотных автоколебаний в гидравлической системе с трубкой Вентури //Динамика насосных систем.- Киев: Наук. думка, 1980.- С.110-115.

11. Манько И.К. Шепелев А.П. Исследование зависимости коэффициента расхода кавитирующей трубки Вентури от угла раскрытия диффузора // Математические модели рабочих процессов в гидродневмосистемах. - Киев: Наук. думка, 1981. - С.24-26.
12. Манько И.К. Жулай Ю.А., Уварова Л.И. Некоторые результаты исследования тонкой пульсирующей струи // Кавитационные колебания и динамика двухфазных систем. - Киев: Наук. думка, 1985. - С.97-102.
13. А. с. N505444/СССР/. Генератор колебаний давления воды / В.В.Пилипенко, В.А.Задонцев, И.К.Манько, Н.И.Довготько, В.А.Дрозд. - Оpubл. Б.И., 1976, № 9.
14. А.с. 543824 /СССР/ Генератор колебания жидкого теплоносителя в кожухе - хотрубном теплообменнике /И.К.Манько, В.А.Задонцев, В.В.Пилипенко. - Оpubл. в Б.И., 1977, № 3.
15. А.с. 597443 /СССР/. Установка для мойки трубопроводов пульсирующей жидкостью /В.А.Задонцев, В.В.Пилипенко, И.К.Манько. - Оpubл. в Б.И., 1978, №10.
16. А.с. 621416 /СССР/. Способ удаления окалины с поверхности нагретого металла /В.В.Пилипенко, И.К.Манько, В.А.Дрозд, В.А.Задонцев. - Оpubл. в Б.И., 1978, № 32.
17. 698678 /СССР/. Генератор колебаний давления воды / В.В.Пилипенко, В.А.Задонцев, И.К.Манько. - Оpubл. в Б.И., 1979, № 43.
18. 719702 /СССР/. Генератор колебаний давления воды / В.В.Пилипенко, В.А.Задонцев, И.К.Манько. - Оpubл. в Б.И., 1980, № 9.
19. А.с. 828775 /СССР/. Способ увлажнения угольных пластов / А.В.Родин, Л.М.Васильев, В.В.Пилипенко, В.А.Задонцев, В.А.Дрозд, И.К.Манько, В.И.Бандурин. - Оpubл. в Б.И., 1981, №17.
20. А.с. 1034453 /СССР/. Устройство для импульсного нагнетания воды в угольный пласт / А.В.Родин, Л.М.Васильев, В.В.Пилипенко, В.А.Задонцев, В.А.Дрозд, И.К.Манько, В.И.Бандурин. - Оpubл. в специздании, 1983.
21. А.с. 1056511 /СССР/. Устройство гидросбива окалины импульсной струей /В.В.Пилипенко, И.К.Манько, Ю.А.Жулай, С.И.Крутиков. - Оpubл. в специздании, 1983.

22. А.с. 1126019 /СССР/. Импульсный водомет /В.В.Пилипенко, И.К.Манько, Ю.А.Жулай, Е.Т.Григорук. - Оpubл. в специздании, 1984.

23. А.с. 1140831 /СССР/. Форсунка для распыления жидкости в импульсном режиме /В.В.Пилипенко, И.К.Манько, Ю.А.Жулай. - Оpubл. в Б.И., 1985., № 7.

24. А.с. 1143888 /СССР/ Эжектор /В.А.Задонцев, И.К.Манько, В.Н.Рыжков. - Оpubл. в Б.И., 1985., № 9.

25. А.с. 1176658 /СССР/. Способ подземной выплавки серы и устройство для его осуществления /В.В.Пилипенко, В.А.Задонцев, И.К.Манько, Н.А.Дзоз, Ю.А.Жулай. - Оpubл. в специздании, 1985.

26. А.с. 1180084 /СССР/. Способ получения импульсов давления жидкости /В.В.Пилипенко, В.А.Задонцев, И.К.Манько, Ю.А.Жулай, Н.А.Дзоз. - Оpubл. в Б.И., 1985, № 35.

27. А.с. 1232296 /СССР/. Генератор колебаний давления жидкости / В.В.Пилипенко, В.А.Задонцев, И.К.Манько, Ю.А.Жулай, Н.А.Дзоз. - Оpubл. в Б.И., 1986, №19.

28. А.с. 1249108 /СССР/. Способ получения импульсов давления жидкости и устройство для его осуществления /В.В.Пилипенко, В.А.Задонцев, И.К.Манько, Ю.А.Жулай, Н.А.Дзоз. - Оpubл. в специздании, 1986.

29. А.с. 1280737 /СССР/. Генератор импульсов давления жидкости / В.В.Пилипенко, В.А.Задонцев, И.К.Манько, Н.А.Дзоз, В.И.Костюк - Оpubл. в специздании, 1986.

30. А.с. 1335382 /СССР/. Режущий инструмент. /В.В.Пилипенко, В.А.Задонцев, И.К.Манько, А.И.Эльке, В.А.Зайцев. - Оpubл. в Б.И., 1987, № 33.

31. А.с. 1366238 /СССР/. Способ очистки изделий и устройство для его осуществления /В.В.Пилипенко, В.А.Задонцев, И.К.Манько, Н.А.Дзоз, В.И.Костюк. - Оpubл. в Б.И., 1988, №2.

32. А.с. 1378107 /СССР/. Способ консервирования жидкости и устройство для его осуществления /В.В.Пилипенко, В.А.Задонцев, И.К.Манько, В.А.Дрозд, В.П.Северин. - Оpubл. в специздании, 1987.

33. А.с. 1466808 /СССР/. Способ получения импульсов давления жидкости и устройство для его осуществления /В.В.Пилипенко, В.А.Задонцев, И.К.Манько, А.И.Эльке, С.В.Зайцев. - Оpubл. в Б.И., 1989, №11.

34. А.с. 1469583 /СССР/. Способ извлечения мяса мелких ракообразных и устройство для его осуществления / В.В.Пилипенко, В.А.Задонцев, И.К.Манько, В.П.Северин, В.И.Костюк. - Оpubл. в специздании, 1989.

35. А.с. 1496351 /СССР/. Способ бурения скважин и устройство для его осуществления / В.В.Пилипенко, Н.М.Гавриленко, В.А.Задонцев, И.К.Манько, Н.А.Дзоз, А.Н.Давиденко, В.А.Дрозд, А.И.Шепель, С.Я.Сологуб, А.Т.Киселев, Ю.А.Меламед. - Оpubл. в специздании, 1989.

36. 1590124 /СССР/ Устройство для получения тонкодисперсных систем /В.В.Пилипенко, В.А.Задонцев, И.К.Манько, Н.А.Дзоз, В.В.Волков, В.П.Северин, В.И.Костюк. - Оpubл. в Б.И., 1990, №33.

37 .А.с. 1821996 /СССР/. Способ приготовления эмульсий и устройство для его осуществления /В.В.Пилипенко, В.А.Задонцев, И.К.Манько, Н.А.Дзоз, О.И.Моргунов. - Оpubл. в специздании, 1992.

38. А.с. 1829209 /СССР/. Способ получения импульсов давления жидкости и устройство для его осуществления //В.В.Пилипенко, В.А.Задонцев, И.К.Манько, В.П.Северин, Н.Л.Томчаков. - Оpubл. в специздании, 1993.

#### АННОТАЦИЯ

Манько И.К. Автоколебания, вызванные кавитацией в местных гидросопротивлениях, и их применение в технике. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.07: - механика жидкостей газа и плазмы. Институт гидромеханики НАН Украины, Киев, 1996. Защищается диссертация, в которой содержатся результаты экспериментальных исследований высокочастотных колебаний потока жидкости в гидравлической системе, обусловленных режимом периодически-срывной кавитации, возникающим при определенных условиях в проточных каналах осесимметричных местных гидросопротивлений типа дроссельных шайб и сопел Вентури. Результаты исследований использованы при разработке кавитационных генераторов колебаний

давления жидкости и устройств для интенсификации различных технологических процессов. Исследована физическая картина течения жидкости в местных гидросопротивлениях, установлены причинно-следственные связи возникновения режима периодически-срывной кавитации, при котором стационарный поток жидкости преобразуется в пульсирующий. Получены экспериментальные зависимости частоты и размаха колеблющейся величины давления от режимных и геометрических параметров местных гидросопротивлений и расчетные формулы для частоты и размаха колеблющейся величины давления.

Ключевые слова: кавитация, автоколебания, пульсирующая струя, генератор колебаний, частота, размах колеблющейся величины давления, местное гидросопротивление.

#### Resume

Man'ko I.K. "Self-oscillations due to cavitation in local hydroresistors and their application in technique". Thesis submitted for awarding the scientific degree of a candidate of physical and mathematical sciences on speciality 05.14.07. - fluid and plasma dynamics. Institute of Hydromechanics of NAS of Ukraine, Kiev, 1996. The thesis is presented which incorporates the results of experimental investigations on high-frequency liquid flow self-oscillations in a hydraulic system due to a periodically stalled cavitation regime occurring under definite conditions in flow channels of axially symmetric local hydroresistors of throttling orifice and Venturi nozzle type. The research results have been used in developing the cavitation liquid pressure oscillators and devices for different technological process intensification. The physical pattern of a liquid flow in local hydroresistors has been studied, the cause and effect relations of periodically stalled cavitation regime occurrence at which a steady-state liquid flow is transformed into a pulsating flow have been established. Experimental dependencies of the frequency and fluctuating pressure value swing on regime and geometric parameters of local hydroresistors and the calculation formulas for the frequency and fluctuating pressure value swing have been obtained.

Key words: cavitation, self-oscillations, pulsating jet, oscillator, frequency, fluctuating pressure value swing, local hydroresistor.

436797

Ав 35.281

Підп. до друку 10.07.96, Формат 60 x 84/24  
Папір ~~серсетний~~ Умовн. друк. арк. 0,93  
Обл.-вид арк. 1,0  
Тираж 100 пр. Зам. 1419.

---

Друк. ДГУ роман пр. зам. 1419.