

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ГІДРОДИНАМІКИ ПОТОКУ В КАВІТАЦІЙНИХ ЗМІШУВАЧАХ З РІЗНИМИ ТИПАМИ НАСОСІВ

Авдєєва Л.Ю., д-р техн. наук, ст. наук. співр., Макаренко А.А., канд. техн. наук  
Інститут технічної теплофізики НАН України, Київ

**Анотація.** Кавітаційні явища супроводжуються швидким переходом енергії з однієї форми в іншу, що сприяє виникненню складного багаторівневого впливу на складні гетерогенні дисперсні системи і дозволяє їх застосовувати для інтенсифікації багатьох гідромеханічних процесів. Насоси різних типів є необхідним обладнанням для роботи будь-якого гідродинамічного кавітаційного апарату. Через те, що їх робота відбувається при високих тисках і швидкостях потоку, виникнення ефектів явища кавітації може призвести до негативних наслідків.

В статті представлені результати досліджень деяких показників гідродинаміки потоку в проточних статичних кавітаційних змішувачах із застосуванням динамічного відцентрового і об'ємного шестеренного насосів, а також варіант компоновки кавітаційного змішувача двома однотипними відцентровими насосами змонтованими паралельно для прогнозування їх поведінки під час проектування і експлуатації. Загалом для досліджень використовувались три кавітаційні змішувачі із насосами різних типів і змінними кавітаційними реакторами типу сопла Вентури з діаметрами горловини сопла від 0,004 м до 0,016 м.

Для характеристики гідромеханічних процесів були досліджені витрати розчину в кавітаційних змішувачах різної комплектації, число Рейнольдса і число кавітації від кількості циклів обробки для різних типів насосів. Аналіз одержаних результатів дозволяє стверджувати, про ефективність використання відцентрових насосів, як окремо, так і в системі. Відцентрові насоси дозволяють отримати більш високі значення витрат, швидкості течії потоку і розвинення явища гідродинамічної кавітації, що є позитивним для інтенсифікації гідромеханічних і масообмінних процесів. Проте, для забезпечення їх стабільної роботи необхідно контролювати параметри проведення процесу і обмежити тривалість обробки для того, щоб не вийти за межі нормованих критичних показників. Для характеристики явища гідродинамічної кавітації, зменшення негативних ефектів і збільшення позитивного впливу, крім розрахунку числа кавітації, необхідно також враховувати комплекс гідродинамічних показників, пов'язаних із особливостями конструкції обладнання і властивостями рідини.

**Ключові слова:** гідродинамічна кавітація, кавітаційні змішувачі, число Рейнольдса, число кавітації, відцентровий насос, об'ємний шестеренний насос, масообмінні процеси.

Основні процеси в хімічній, фармацевтичній і харчовій промисловості пов'язані з обробкою складних багатокомпонентних дисперсних систем із утворенням в результаті розчинів, суспензій, екстрактів, емульсій із заданими фізико-хімічними властивостями. Ці процеси відносяться до енерговитратних. Введена зовнішня енергія витрачається на диспергування однієї з фаз і збільшення площі міжфазної поверхні, перемішування дисперсійного середовища і турбулізацію міжфазної поверхні. Для зниження загальних енерговитрат пропонують використання нових, більш ефективних фізичних, хімічних і ін. методів впливу на дисперсну систему, які дозволяють створити високу питому потужність на одиницю об'єму при зниженні тривалості впливу [1, 2].

Останнім часом, все частіше для інтенсифікації гідромеханічних процесів у складних гетерогенних дисперсних системах дослідники пропонують застосування кавітаційних ефектів. Надзвичайно інтенсивні динамічні ефекти, що виникають в результаті розвитку і схлопування бульбашкових систем при виникненні явища гідродинамічної кавітації можуть призводити до позитивних або небажаних проявів. Неконтрольована дія цього явища може призвести до серйозних збоїв в роботі і навіть руйнування конструкції обладнання. Водночас, раціональне застосування кавітаційних ефектів може вирішити питання інтенсифікації багатьох технологічних процесів в різних сферах виробництва, а тому створення і застосування кавітаційних технологій привертають пильну увагу дослідників. Позитивне застосування кавітаційних ефектів дозволяє провести значну економію енерговитрат, збільшити продуктивність технологічних процесів і отримати високу якість обробки дисперсних систем [2 - 4].

Кавітація - це явище розриву цілісності рідини під впливом розтягуючих напружень і утворення заповнених газом та паром бульбашок або порожнин. Це явище виникає в рідких середовищах внаслідок різкого зниження тиску. При падінні тиску нижче за деяке критичне значення  $P_{\text{кав}}$  в окремих точках системи виникають умови для розриву суцільності рідини із послідовним формуванням і еволюцією кавітаційних бульбашок. Їх схлопування призводить до значного динамічного впливу на частинки дисперсної фази. При цьому, акумульована в системі потенційна енергія перетворюється в кінетичну енергію радіального руху ріди-

ни, дискретно розподілену у просторі і часі. При розриві суцільності рідини утворюється і поширюється у формі ударної сферичної хвилі короткотривалий імпульс. Таким чином, кінетична енергія радіального руху рідини перетворюється на механічну енергію кумулятивного мікроструменя з інтенсивним імпульсним впливом на дисперсну частинку. Одночасно із цим відбувається інтенсивне збурювання безперервної фази. Таким чином, кавітаційні явища супроводжуються швидким перетворенням енергії з однієї форми в іншу, а локалізована енергетична дія проявляється у вигляді короткотривалих дискретно розподілених імпульсів високої потужності. Викид кумулятивного мікроструменя відбувається із виникненням імпульсних аномально високих локалізованих тисків, температур, швидкостей і прискорень. Надзвичайно швидка трансформація енергії сприяє суттєвому підвищенню ефективності впливу на складні дисперсні гетерогенні системи [2, 4, 5].

У промисловості найчастіше використовують гідродинамічну кавітацію, яка дає змогу обробляти великі об'єми гетерогенних систем у потоці. Насоси різних типів є необхідним обладнанням для роботи будь-якого гідродинамічного кавітаційного апарату. Різниця тисків, які виникають в зоні місцевих опорів і інтенсивність кавітаційного впливу визначає рівень акумульованої в системі потенційної енергії і залежить від властивостей дисперсних систем і гідродинамічних умов в потоці, обумовлених типами, конструктивними особливостями і геометричними характеристиками місцевих опорів. Від їх роботи залежить виникнення і потужність динамічних впливів в гідродинамічних кавітаційних апаратах, ефективність проходження заданих технологічних процесів в об'ємі і відповідність отриманої гетерогенної системи заданим характеристикам [2, 4, 6, 7].

В технологічних процесах широко використовується різні типи динамічних або об'ємних насосів, які мають забезпечити заданий профіль тиску всієї системи і необхідний гідродинамічний режим роботи технологічного обладнання. В технологічних лініях кавітаційних змішувачів широко використовуються відцентрові і шестеренні насоси, до яких висуваються особливі вимоги через те, що вони використовуються для подачі рідких середовищ і працюють при високих тисках. Посилення можливих кавітаційних ефектів відбувається в закритих зонах робочої камери насосів. В разі різкого зниження тиску в якійсь зоні робочої камери нижче за критичний тиск насиченої пари  $P_{\text{кав}}$  відбувається формування, інтенсивне зростання, стиснення і схлопування парових кавітаційних бульбашок із виділенням великої кількості енергії. Розвиток кавітаційних бульбашок в таких зонах може бути викликаний неправильним встановленням насоса і низьким тиском на вході (на стороні всмоктування), роботою на швидкості обертання або швидкості потоку, які перевищують номінальні, підвищеної температурі рідини, що транспортується і т.ін. [8, 9]

Структура гідродинамічного потоку в середині відцентрового насоса є складною через наявність обертального робочого колеса та його взаємодії зі спіральним корпусом. Стабільна робота насоса забезпечується в такому режимі, коли тиск у всіх точках його внутрішньої порожнини вищим за тиск насичених парів рідини, що переміщається, при цій температурі. При умові, коли тиск рідини падає нижче тиску її насиченої пари виникають потенційно шкідливі ефекти явища кавітації. У відцентрових насосах велике падіння тиску спостерігається у всмоктуючому трубопроводі робочого колеса і його підвищення всередині лопаток. У об'ємних насосах, при певних умовах роботи, тиск рідини падає при подачі рідини у насосну камеру в області зачеплення двох шестерень і знову зростає при виході з робочої камери. Утворення кавітаційних бульбашок призводить до зменшення продуктивності насосу, а їх схлопування - до збільшення вібрації, шуму, підвищення температури рідини, виникнення ерозії, пошкодження конструктивних елементів насосу. Непотійні умови, пов'язані з кавітацією можуть вплинути на споживання електроенергії. В разі виникнення кавітаційних процесів витрати електроенергії можуть коливались і бути вищими для досягнення заданої пропускної здатності насосу [2, 9, 10].

Наявність таких зон неодноразово підтверджувалась рядом досліджень, однак до теперішнього часу відсутні результати, які дозволяють описати особливості гідродинамічних процесів в насосах різних типів і конструкцій при їх роботі у складі кавітаційного змішувача. Для уникнення збоїв в роботі обладнання важливо підібрати насос до рідини, системи та застосування, що потребує проведення додаткових досліджень. Для цього необхідно виконати багатофакторний аналіз впливу кожної ділянки технологічної лінії.

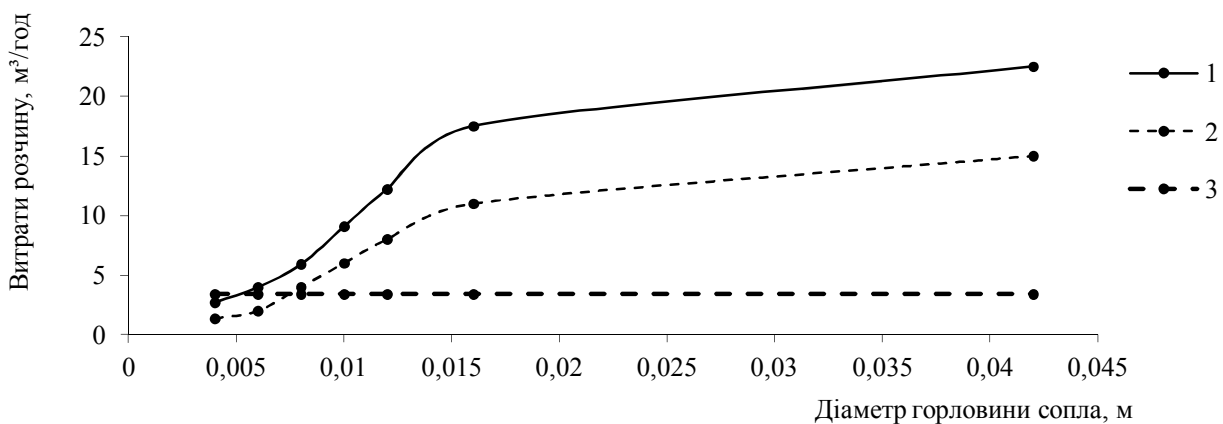
**Метою роботи** було дослідження деяких показників гідродинаміки потоку в проточних статичних кавітаційних змішувачах із застосуванням динамічного відцентрового і об'ємного шестеренного насосів для прогнозування їх поведінки під час проектування і експлуатації.

Для проведення досліджень був створений експериментальний стенд, який дозволяє вимірювати і регулювати гідродинамічні умови обробки складних гетерогенних систем у процесах екстракції, диспергування, гомогенізації, розчинення і змішування. Стенд змонтований на пересувній платформі з металеву опорною рамою і складається з пульту управління, змінних насосів із запірною арматурою, змінних кавітаційних реакторів типу сопла Вентурі з діаметрами горловини сопла від 0,004 м до 0,016 м, манометрів, витратоміра, термометра з виносним датчиком і циліндричної приймальної ємності [2].

Для проведення досліджень в лінію горизонтально вбудовувались насоси - гідродинамічний відцентровий або об'ємний шестеренний з зовнішнім евольвентним зачепленням однакової потужності. Було також запропоновано варіант компонування кавітаційного змішувача із двома однотипними відцентровими насосами змонтованими паралельно. Загалом для досліджень використовувались три кавітаційні змішувачі

із змінними кавітаційними реакторами типу сопла Вентурі з різними діаметрами горловини сопла. За їх допомогою на робочій ділянці експериментального стенду створювався потік ньютонівських рідин певної швидкості і тиску, які регулювались. В дослідженнях використовувалась свіжовідібрана відфільтрована водопровідна вода.

Виникнення і розвиток гідродинамічної кавітації при роботі насосу виникає локально при зниженні тиску до або нижче тиску насичених парів і викликано зміною гідродинамічного руху рідини в каналі трубопроводу. Тиск рідини може зменшуватись через збільшення гравітаційної або кінетичної енергії рідини. Збільшення гравітаційної енергії відбувається при збільшенні напору рідини через збільшення висоти труби. Збільшення кавітаційної енергії може відбуватись через різке зменшення поперечного перерізу каналів потоку. Гідравлічний рух рідини характеризується витратами і швидкістю потоку, які не завжди відповідають заявленим паспортним даним через різні умови експлуатації або виникнення таких явищ, як кавітація. В значній мірі витрати пов'язані з напірними характеристиками (зовнішнього навантаження) і залежать від тиску на виході з насоса. Але значення витрат рідини можуть зменшуватись через локальне зниження місцевого тиску на вході в насоси, що також може призвести до кавітації. Результати експериментального визначення цих показників для відцентрового і шестеренного насосів наведені на рис.1 і 2.



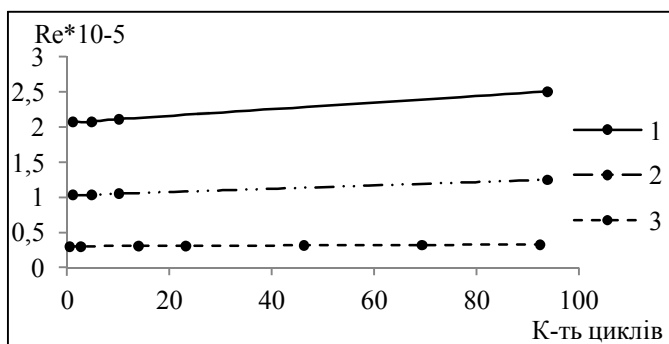
1 – система динамічних відцентрових насосів; 2 – динамічний відцентровий; 3 – об'ємний шестеренний

**Рис.1 – Залежність витрат розчину від діаметра сопла кавітаційного реактора для різних типів насосів**

Отримані результати свідчать (рис.1), що для відцентрового насосу зі збільшенням діаметра горловини сопла і зменшенням площі місцевого опору потоку у трубі, витрати розчину збільшуються. Спостерігається майже лінійна залежність між збільшенням діаметру горловини сопла і витратами розчину, яка дещо порушується для змішувачів з кавітаційними реакторами з горловиною сопла від 0,004 м до 0,01 м. Значення витрат рідини є дещо меншими за показники які прогноуються. Більш вираженою така залежність є для гідродинамічного кавітаційного змішувача із застосуванням системи з двома відцентровими насосами. Значення витрат рідини можуть зменшуватись через різку локальну зміну місцевого тиску, що викликаний зміною поперечного перерізу каналів, що призводить до виникнення кавітаційного кластеру і деякого заглушення потоку. Найбільші значення витрат спостерігаються при відсутності місцевого опору у вигляді кавітаційного реактора. При паралельній роботі двох відцентрових насосів відмічається збільшення значень витрат рідини, але сумарна подача двох паралельно з'єднаних насосів не дорівнює сумарній подачі цих насосів, а у всіх випадках є меншою при їх окремій роботі, що підтверджується даними літератури [10]. Для об'ємного шестеренного насосу рідина подається з прийнятною ємністю переривчасто, однаковими окремими порціями, які витісняються із зазначеного об'єму силовими елементами таким чином, щоб потік на вході, за допомогою міцного і герметичного контакту зубів шестерень між собою, був постійно і дуже герметично роз'єднаний із потоком на виході. Таким чином, витрати розчину залишаються постійними в усіх випадках.

Серед показників, які впливають на інтенсивність виникнення кавітаційних ефектів в потоці є швидкість руху потоку. При значному зростанні швидкості збільшується вірогідність виникнення розрідження потоку через збільшенні різниці тисків при проходженні потоку через місцевий опір, тому явище кавітації характерно для великих швидкостей. Для напірних потоків в трубах швидкість рідини впливає на характер руху потоку і визначається числом Рейнольдса (Re).

Результати експериментального визначення і розрахунку числа Re для відцентрового і шестеренного насосів без використання гідродинамічних кавітаційних реакторів наведені на рис.2.



1 – система динамічних відцентрових насосів; 2 – динамічний відцентровий; 3 – об'ємний шестеренний  
**Рис.2 – Залежність числа Рейнольдса від кількості циклів обробки для різних типів насосів**

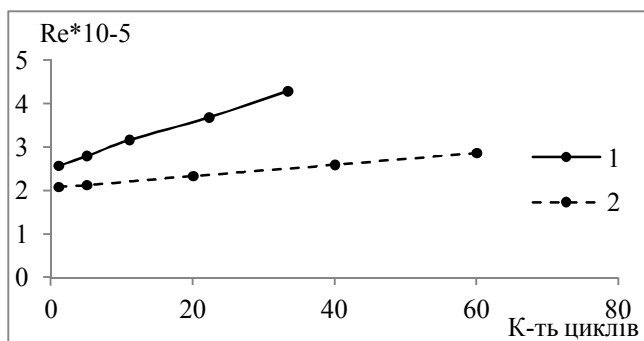
відцентрового насосу число  $Re$  збільшується майже на 70 %, а для системи з двох таких насосів – в 6,6 рази. Високі швидкості течії в динамічних відцентрових насосах потенційно (при наявності інших умов) можуть призводити до виникнення в закритих зонах кавітаційних ефектів і порушення роботи. Так, робота впродовж 90 циклів як одного, так і системи гідродинамічних насосів призводить до незначного збільшення числа  $Re$ , що можна пояснити деяким незначним підвищенням температури рідини і зниженням в'язкості в процесі роботи, що викликано особливостями руху в насосі цього типу. Така поведінка насосу непрямо може свідчити про відсутність ефектів, викликаних гідродинамічною кавітацією. Тривала робота об'ємного шестеренного насосу не призводила до зміни значень числа  $Re$ . Із результатів, представлених на рис. 2 можна зробити висновок про доцільність використання системи з двох відцентрових насосів у складі кавітаційного змішувача для інтенсифікації масообмінних технологічних процесів, пов'язаних з диспергуванням і гомогенізацією.

Результати досліджень зміни характеру руху рідини зміни значень числа  $Re$  в кавітаційних змішувачах з використанням місцевого опору у вигляді кавітаційних реакторів з різним діаметром горловини сопла і різних типів насосів наведені рис.3. на прикладі реактора з горловиною сопла 6 мм.

Результати показали високі швидкості течії потоку для обох конструкцій кавітаційних змішувачів, але в різній мірі. Вже після першого циклу оброблення рідини в кавітаційному змішувачі з соплом із діаметром горловини 0,006 м із системою динамічних відцентрових насосів значення числа  $Re$  дорівнює  $2,6 \cdot 10^5$ , що є характерним для розвинутого турбулентного руху.

В результаті оброблення рідини в кавітаційному змішувачі із шестеренним насосом швидкість течії потоку зростає не настільки інтенсивно, значення числа  $Re$  зростають з  $2,08 \cdot 10^5$  до  $2,3 \cdot 10^5$  після 20 циклів, коли рух потоку у змішувачі з початкової стадії досягає значень стадії розвинутої турбулізації потоку.

На нашу думку, кавітаційний характер руху виникає для потоку в обох конструкціях кавітаційних змішувачів внаслідок раптової зміни геометрії течії у вигляді встановленої трубки Вентурі із горловиною сопла 0,006 м, коли площа перерізу потоку струменя різко зменшується на 85 % до мінімальної. Такий висновок був зроблений через отримання в результаті експерименту високих швидкостей руху і підвищення температури рідини в результаті обробки на 26,4 °C для системи відцентрових насосів і на 15 °C для шестеренного насосу.



1 – система динамічних відцентрових насосів; 2 – об'ємний шестеренний  
**Рис.3 – Залежність числа Рейнольдса від кількості циклів обробки для кавітаційного змішувача з використанням реактора з горловиною сопла 6 мм і різних типів насосів.**

Опосередковано, про наявність гідродинамічної кавітації в потоці рідини можуть свідчити високі значення числа  $Re$ . Однак, питання величини критичного значення числа Рейнольдса, коли виникає нестійкість турбулентного руху і його перехід в кавітаційний режим в результаті утворення бульбашок в зонах високого тиску і турбулентних коливань і досі не одержало свого остаточного вирішення. Величина числа Рейнольдса при якому виникає первинна кавітація залежить від багатьох умов, в т.ч. умов входу потоку в трубу, шорсткості її стінок і ін. чинників. Дані, представлені на рис.2 свідчать про значне збільшення числа  $Re$  для динамічного відцентрового насоса, порівняно до шестеренного. Так, для динамічного

в результаті оброблення рідини в кавітаційному змішувачі із шестеренним насосом швидкість течії потоку зростає не настільки інтенсивно, значення числа  $Re$  зростають з  $2,08 \cdot 10^5$  до  $2,3 \cdot 10^5$  після 20 циклів, коли рух потоку у змішувачі з початкової стадії досягає значень стадії розвинутої турбулізації потоку.

На нашу думку, кавітаційний характер руху виникає для потоку в обох конструкціях кавітаційних змішувачів внаслідок раптової зміни геометрії течії у вигляді встановленої трубки Вентурі із горловиною сопла 0,006 м, коли площа перерізу потоку струменя різко зменшується на 85 % до мінімальної. Такий висновок був зроблений через отримання в результаті експерименту високих швидкостей руху і підвищення температури рідини в результаті обробки на 26,4 °C для системи відцентрових насосів і на 15 °C для шестеренного насосу.

Як відомо, для циліндричних, конічних насадок, а також труб Вентурі зміна геометрії руху призводить до різкого перепаду тисків, зростання частки утвореної газопарової фази, зростання зони кавітації і підвищення температури внаслідок швидкого колапсу кавітаційних бульбашок і виникнення інших ефектів. Таким чином, в результаті обробки рідини в обох експериментальних кавітаційних змішувачах утворюються умови для виникнення і еволюції кавітаційних бульбашок і пов'язаними кавітаційними ефектами, що в свою чергу дозволить покращити умови диспергування.

Аналіз результатів, наведених на рис.2 і 3 дозволяє стверджувати, що ефективність використання відцентрових насосів, як окремо, так і в системі, є вищою для отримання висо-

ких значень швидкості течії потоку і виникнення явища гідродинамічної кавітації для інтенсифікації масообмінних процесів, порівняно до шестеренного насосу. Проте, для забезпечення стабільної роботи цих насосів у комплектації кавітаційного змішувача необхідно контролювати параметри проведення процесу і обмежити тривалість обробки для того, щоб не вийти за межі нормованих критичних показників.

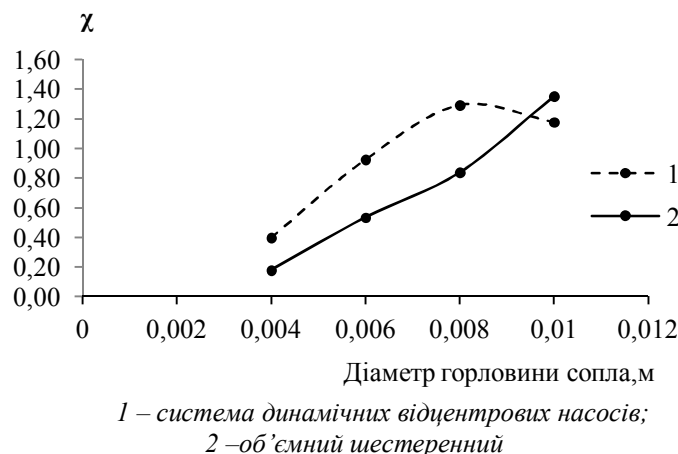
Момент виникнення і інтенсивність явища кавітації можуть змінюватися від багатьох факторів: геометрії течії, швидкості, умов зміни тиску та температури потоку, властивостей рідини, кількості розчиненого газу та ін. В якості параметра для характеристики явища кавітації, яке виникає при проходженні потоку рідини через кавітаційну систему використовувались значення числа кавітації, що є мірою просторової густини енергії. Для різних процесів і різних геометрій кавітаційних камер початкове число кавітації і методи його визначення можуть бути різними, немає стандартного набору параметрів, які використовуються для розрахунку числа кавітації [2, 4, 10]. В дослідженнях для розрахунку кавітаційного числа користувались формулою:

$$\chi = \frac{p - p_{\text{кав}}}{1/2\rho \cdot v^2},$$

де  $p$  – тиск перед соплом, Па;  $p_{\text{кав}}$  – тиск насиченої пари, при якому виникає кавітація, Па;  $\rho$  – густина рідини, кг/м<sup>3</sup>;  $v$  – швидкість течії в горловині сопла, м/с.

З результатів багатьох досліджень відомо, що вплив кавітаційних ефектів відсутній повністю або незначний при значеннях чисел кавітації  $\chi > 2$ , а найбільша інтенсивність впливу виникає при значеннях чисел кавітації  $\chi < 1$ . Проте, дуже низькі робочі числа кавітації можуть призвести до суперкавітації і утворення хмари пари при відсутності колапсу кавітаційних бульбашок [3-5, 10]. На рис.4 наведені результати розрахунку кавітаційного числа  $\chi$  в залежності від діаметру горловини реактора кавітаційних змішувачів для системи динамічних відцентрових насосів і шестеренного насосу.

Наведені результати (рис.4) свідчать про те, що найбільший вплив на виникнення явища кавітації має діаметр горловини сопла. Зі збільшенням розміру прохідного діаметру кавітаційного реактора, тиск перед соплом зменшується, а кавітаційне число відповідно збільшується для обох комплектацій насосів в кавітаційних змішувачах.



**Рис.4 – Залежність кавітаційного числа  $\chi$  від діаметру горловини сопла для кавітаційними змішувачами з насосами різних типів**

В проведених експериментах найменші значення чисел кавітації  $\chi$  спостерігаються при діаметрі горловини сопла 0,004 м: для системи відцентрових насосів – 0,4 і для шестеренного – 0,18. Це свідчить про високий ступінь розвитку ефектів гідродинамічної кавітації, маленький діаметр утворених кавітаційних бульбашок і можливість отримання високої дисперсності утвореної системи за рахунок дії кумулятивних мікроструменів. Проте, внаслідок виникнення двофазного потоку рідини, який утворюється при гідродинамічної кавітації, така комплектація змішувача характеризується низькими витратами розчину, значною тривалістю і енерговитратами процес обробки. При високих швидкостях течії, які для дослідних кавітаційних змішувачів характерні для діаметрів горловини сопла 0,012 і більше тривалість кавітаційного впливу може бути недостатньою для утворення бульбашок і отримання необхідного рівня інтенсивності обробки. У випадку, коли тривалість перебування частинки в зоні зниженого тиску, ймовірність масового виникнення і повного розвитку кавітаційних бульбашок є високою. Для зменшення негативних ефектів і збільшення позитивного впливу виникнення явища гідродинамічної кавітації необхідно провести вибір раціональних умов проведення процесу і враховувати комплекс гідродинамічних показників.

**Висновки.** Дослідження показали більш високу ефективність використання відцентрових насосів, як окремо, так і в системі, порівняно до шестеренного насосу. Відцентрові насоси дозволяють отримати більш високі значення витрат, швидкості течії потоку і розвинення явища гідродинамічної кавітації, що є позитивним для інтенсифікації технологічних процесів. Проте, для забезпечення надійної роботи цих насосів у комплектації кавітаційного змішувача необхідно контролювати параметри проведення процесу і обмежити тривалість обробки, щоб не вийти за межі нормованих критичних показників.

Аналіз результатів показав, що розрахунок числа кавітації є недостатньою характеристикою для прогнозування виникнення та розвитку кавітації в потоці рідини кавітаційних змішувачів різної комплектації. Для зменшення негативних ефектів і збільшення позитивного впливу виникнення явища гідродинамічної кавітації необхідно враховувати комплекс гідродинамічних показників, пов'язаних із особливостями конструкції

обладнання і властивостей рідини. Це дозволить вибрати раціональні умови для проведення інтенсифікації багатьох гідромеханічних і масообмінних процесів при забезпеченні значної економії енерговитрат і отриманні високої якості обробки.

### References

1. Paul Stevenson, W. (2017). Handbook of Industrial Mixing: Science and Practice. John Wiley & Sons.
2. Dolinskii A.A., Avdeeva L.Yu., Makarenko A.A. (2020) Cavitation technologies for the production of nanopreparations. Kyiv: Nauk. Dumka.
3. Asaithambi, N, Singha, P, Dwivedi, M, Singh, SK. (2019) Hydrodynamic cavitation and its application in food and beverage industry: A review. J Food Process Eng. 42:e13144. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13144>
4. Ivanytskii G.K., Stepaniuk A.R. (2021) Processes and equipment of deep processing of organic raw materials: lecture notes [Electronic resource]: study guide for students.
5. Brennen, C. (2013). Cavitation and Bubble Dynamics. Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107338760>
6. Avdeeva, L., Zhukotskyi, E., & Makarenko, A. (2019). Doslidzhennia kavitatsiinykh efektyv v nasosakh riznykh typiv. Scientific Works, 83(1), 74-79. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v83i1.1421>.
7. Březina, M. (2018). Cavitation and Bubble Dynamics in Pumps and Turbomachines. Springer.
8. Rakibuzzaman, M., Kim, K. & Suh, S. (2018). Numerical and experimental investigation of cavitation flows in a multistage centrifugal pump. JMech SciTechnol 32, 1071–1078 <https://doi.org/10.1007/s12206-018-0209-6>
9. G. Mousmoulis, N. Karlsen-Davies, G. Aggidis, I. Anagnostopoulos, D. Papantonis, (2019) Experimental analysis of cavitation in a centrifugal pump using acoustic emission, vibration measurements and flow visualization, European Journal of Mechanics - B/Fluids, Vol. 75, P. 300-311, <https://doi.org/10.1016/j.euromechflu.2018.10.015>.
10. Ferrari A. (2017) Fluid dynamics of acoustic and hydrodynamic cavitation in hydraulic power systems Proc. R. Soc. A.473: 20160345 <https://doi.org/10.1098/rspa.2016.0345>

## INVESTIGATION OF HYDRODYNAMIC PARAMETERS IN CAVITATION MIXERS WITH DIFFERENT TYPES OF PUMPS

Avdieieva L.Yu., Dr. Eng. Sci., Senior Research Associate, Makarenko A.A., Cand. Eng. Sci.  
Institute of Engineering Thermophysics of Ukraine National Academy of Sciences, Kyiv

**Abstract.** Cavitation phenomena are accompanied by rapid energy conversion from one form to another, which leads to complex multi-level effects on complex heterogeneous dispersive systems and enables their application for the intensification of various hydromechanical processes. Pumps of different types are essential equipment for any hydrodynamic cavitation apparatus. However, due to their operation at high pressures and flow velocities, the occurrence of cavitation effects can have negative consequences.

This article presents the research results of certain hydrodynamics indicators of flow in flow-through static cavitation mixers using dynamic centrifugal and volumetric gear pumps, as well as the arrangement variant of a cavitation mixer with two identical centrifugal pumps mounted in parallel to predict their behavior during design and operation. In total, three cavitation mixers with pumps of different types and variable cavitation reactors of the Venturi nozzle type with throat diameters ranging from 0.004m to 0.016m were used for the research.

To characterize the hydromechanical processes, the flow rates of the solution in cavitation mixers of different configurations, Reynolds number, and cavitation number as a function of the processing cycles for different types of pumps were investigated. The analysis of the obtained results allows us to assert that the use of centrifugal pumps, both individually and in a system, is effective. Centrifugal pumps allow for higher flow rates, flow velocities, and development of the hydrodynamic cavitation phenomenon, which is beneficial for intensifying hydromechanical and mass transfer processes. However, to ensure their stable operation, it is necessary to control the process parameters and limit the processing duration to stay within the specified critical limits. To characterize the hydrodynamic cavitation phenomenon, reduce negative effects, and increase positive impact, in addition to cavitation number calculation, it is also necessary to consider a complex of hydrodynamic indicators related to the equipment's design features and fluid properties.

**Key words:** hydrodynamic cavitation, cavitation mixers, Reynolds number, cavitation number, centrifugal pump, volumetric gear pump, mass transfer processes.

### Список використаної літератури

1. Paul Stevenson, W. Handbook of Industrial Mixing: Science and Practice. John Wiley & Sons. 2017, 1448p.
2. Долінський А.А., Авдєєва Л.Ю., Макаренко А.А. Кавітаційні технології для виробництва нанопрепаратів. Київ: Наук. Думка. 2020. 112 с.

3. Asaithambi, N, Singha, P, Dwivedi, M, Singh, SK. Hydrodynamic cavitation and its application in food and beverage industry: A review. *J Food Process Eng.* 2019; 42:e13144. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13144>
4. Іваницький Г.К., Степанюк А.Р. Процеси та обладнання глибокої переробки органічної сировини: концепт лекцій [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 292 с.
5. Brennen, C. *Cavitation and Bubble Dynamics*. Cambridge: Cambridge University Press. 2013 249 p. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107338760>
6. Авдєєва, Л., Жукотський, Е., & Макаренко, А. Дослідження кавітаційних ефектів в насосах різних типів. *Scientific Works*, 2019 83(1), 74-79. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v83i1.1421>
7. Březina, M. *Cavitation and Bubble Dynamics in Pumps and Turbomachines*. Springer. 2018 481 p
8. Rakibuzzaman, M., Kim, K. & Suh, SH. Numerical and experimental investigation of cavitation flows in a multistage centrifugal pump. *J Mech Sci Technol* 2018, 32, 1071–1078 <https://doi.org/10.1007/s12206-018-0209-6>
9. G. Mousmoulis, N. Karlsen-Davies, G. Aggidis, I. Anagnostopoulos, D. Papantonis, Experimental analysis of cavitation in a centrifugal pump using acoustic emission, vibration measurements and flow visualization, *European Journal of Mechanics - B/Fluids*, Vol. 75, 2019, P. 300-311, <https://doi.org/10.1016/j.euromechflu.2018.10.015>.
10. Ferrari A. Fluid dynamics of acoustic and hydrodynamic cavitation in hydraulic power systems *Proc. R. Soc.* 2017, A.473: 20160345 <https://doi.org/10.1098/rspa.2016.0345>

Отримано в редакцію 27.05.2023  
Прийнято до друку 26.11.2023

Received 27.05.2023  
Approved 26.11.2023