**Вітенько Д.О.**

аспірант

**Тернопільський
національний технічний
університет імені Івана
Пулюя****Vitenko D.**

Ph.D. student

**Ternopil Ivan Puluj National
Technical University****УДК 532.528****DOI: 10.37128/2306-8744-2025-1-6**

ЗНОШУВАННЯ В ГІДРОДИНАМІЧНИХ АПАРАТАХ ПО ТИПУ ТРУБИ ВЕНТУРІ

Гідродинамічні апарати статичного типу широко використовують в різних галузях, зокрема в хімічній, харчовій, фармацевтичній та технологіях водоочистки. Ефективність їх використання ґрунтується на ефектах, пов'язаних із життєвим циклом парогазових бульбашок, які формуються за певних гідродинамічних умов в системі. Водночас важливою проблемою таких апаратів є руйнування робочих поверхонь під дією кавітаційної ерозії, що супроводжується втратою матеріалу, зниженням міцності та змінами у структурі матеріалу. Вплив кавітаційного режиму, що виникає за певного співвідношення між тиском та швидкістю, може призводити до утворення мікротріщин, які з часом розвиваються у більш серйозні пошкодження. У статті досліджено окремі аспекти що впливають на кавітаційне зношування стінок моделей з конусною та шнековою перешкодою. Встановлено, що інтенсивність зношування залежить від параметрів потоку, таких як вхідний тиск і швидкість рідини. За результатами чисельного моделювання було встановлено ділянку формування парогазової фази, що було підтверджено експериментальними дослідженнями щодо зміни тиску вздовж апарата та візуальними спостереженнями. Також були зафіксовані найбільші значення прискорень на стінках апарату в межах вихідної дифузornoї ділянки, де відбувається схлопування парогазових бульбашок та їх безпосередній вплив на стінки апарата. Порівняння двох моделей гідродинамічних апаратів показало, що використання конусної перешкоди сприяє рівномірнішому розподілу парогазової фази вздовж дифузора, що потенційно знижує інтенсивність локального зношування. Визначено, що при підвищенні вхідного тиску від 0,4 МПа до 0,6 МПа гідродинамічний режим стабілізується, а парогазова фаза зміщується в центр потоку, що зменшує негативний вплив на стінки, хоча зменшення маси взірця з посиленням кавітаційного взірця зростає, що в свою чергу засвідчує більший вплив на технологічне середовище. Отримані результати сприятимуть розробці ефективних методів зниження зношування та підвищенню ресурсу та ефективності роботи обладнання.

Ключові слова: вібрації, зношування, гідродинаміка, моделювання.

Постановка проблеми. Сучасні гідравлічні системи працюють в умовах високих швидкостей потоку, що обумовлює зростання інтенсивності кавітаційної ерозії. Кавітація – це фізичне явище, що передбачає створення і руйнування великої кількості парогазових бульбашок, які формуються у рідині внаслідок локального зниження тиску та колапсують в ділянках його підвищення, спричиняючи гідродинамічні удари та ерозійне пошкодження

поверхонь. Найчастіше це стосується пошкодження стінок трубопроводів, гідродинамічних апаратів, або лопатей у випадку гідравлічних машин, які широко використовуються для інтенсифікації гідромеханічних та тепломасообмінних процесів.

Аналіз проблеми. Щоб протидіяти негативному впливу ерозії, необхідно враховувати закономірності виникнення та



розвитку явища кавітації залежно від конструкції об'єкту дослідження та режиму його роботи. Кавітаційна ерозія - це механічне руйнування матеріалу або пластична деформація твердої поверхні, що контактує з парогазовою фазою кавітаційного потоку. Ударні хвилі і мікроструміні призводять до механічної дії на поверхню. Це схоже на контакт тверде тіло-тверде тіло, з тертям або без нього. Якщо напруження в матеріалі, що виникають внаслідок гідростатичного тиску на поверхні перевищують межу пружності матеріалу, то це призведе до пластичної деформації на поверхні. Якщо виникають напруження менші від межі пружності матеріалу, то циклічне навантаження може пошкодити матеріал за механізмом поверхневої втоми. Але такий механізм не враховує високі швидкості та малі об'ємні ефекти. Через малий об'єм та масштабний ефект, який слід враховувати, ефект зміцнення не може бути інтерпретований так само, як у класичному механізмі абразивного зношування. З точки зору розсіювання енергії, енергія удару може бути поглинута пружною і пластичною деформацією або руйнуванням. Можливість поглинання енергії шляхом деформації без видалення матеріалу безпосередньо пов'язана з кавітаційною стійкістю матеріалів. Важливим залишається визначення власне ділянок пошкоджень та локалізації парогазової фази.

На сьогодні існує значна кількість наукових результатів щодо вивчення кавітаційного зношування, що підтверджує актуальність цієї проблеми в різних галузях промисловості, що обумовлено необхідністю глибшого розуміння ризиків кавітаційного зношування та його мінімізації. Особливої уваги потребують гідродинамічні аспекти кавітаційних процесів у гідродинамічних моделях по типу труб Вентурі, які широко застосовуються для створення контрольованого кавітаційного ефекту. У зв'язку з цим, дана робота присвячена вивченню та дослідженню ризиків зношування у апаратах по типу труби Вентурі на основі результатів чисельного моделювання та експериментальних досліджень і спостережень. Особлива увага приділяється аналізу розподілу парогазової фази вздовж апарата, визначенню розмірів парогазової хмари, оцінці гідродинамічних характеристик потоку та втрати масо внаслідок кавітаційного впливу. Отримані результати дозволять обґрунтувати доцільність запропонованих конструкцій гідродинамічних апаратів по типу труб Вентурі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Автори [1] розглядають наслідки кавітаційного зношування на реальних об'єктах, зокрема підшипниках. У роботі використано

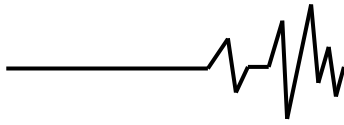
числові моделі, лабораторні випробування та реальні випадки пошкоджень, що мають прикладний контекст. Показано, що кавітаційне зношування в підшипниках залежить від параметрів мастила, геометрії поверхонь і вібрацій. Авторами наведено реальні приклади, які демонструють руйнування через мікрострумені, ударні хвилі та вторинне абразивне зношування. Це допомагає зрозуміти проблеми в реальних системах і запропонувати технічні рішення.

У роботах [1, 2] автори зосереджуються на матеріалах, зокрема модифікації їхньої поверхні та легуванні (Al, V, Mo, Zr). Результати базуються на експериментальних тестах із використанням ультразвукових випромінювачів, аналізі поверхонь за допомогою мікроскопії та рентгеноструктурного аналізу. Автори засвідчують що легування та іонно-плазмова модифікація титанових сплавів збільшують їхню стійкість до кавітаційного зносу у 3–9 разів.

У роботі [3] особливу увагу приділено термоциклічній обробці (ТЦО) як методу підвищення зносостійкості. Результати дослідження можуть бути використані для вибору сталей та оптимізації їхньої обробки для виготовлення деталей, що працюють в умовах кавітаційного навантаження (насоси, турбіни, гідравлічні системи). Разом з тим, у статті не розглядається поведінка сталей за тривалого кавітаційного навантаження, що важливо для оцінки довговічності матеріалів у реальних умовах експлуатації.

Авторами [4] досліджено, що найбільше зношуються робочі лопаті насосів, особливо в ділянках вхідної та вихідної кромки, де спостерігається значне руйнування металу. У роботі враховано як гідродинамічні, так і механічні аспекти кавітаційно-абразивного зношування, що важливо для насосів у системах іригації та водопостачання, де знос є значною проблемою. Хоча дослідження проводилися на реальних насосах, бракує порівняння з іншими типами насосів чи умовами експлуатації. Та попри побудовані залежності, немає детального опису чисельних моделей, які використовувались для аналізу гідродинамічних процесів.

Авторами [5] значну увагу приділено фізичним явищам, які супроводжують кавітацію, впливу властивостей матеріалу на стійкість до ерозії та розглянуто ефективність сучасних технологій захисту. Наведено аналіз результатів щодо аустенітних, мартенситних та феритних сталей, чавунів, сплавів нікелю, алюмінію та титану тощо. У статті представлено механізм руйнування матеріалів, що включає пластичну деформацію, утворення кратерів та мікротріщин.



Деякі автори розглядають не кавітаційне зношування, а зміцнення матеріалів методом кавітаційної обробки поверхні. Детальний аналіз технології кавітаційного зміцнення, яке використовує колапс кавітаційних бульбашок для створення локальних пластичних деформацій поверхні металу наведено в роботі [6]. Автори описують технологію, що дозволяє значно покращити механічні властивості металів, зокрема втомну міцність, без механічного контакту з поверхнею, що є суттєвою перевагою перед іншими методами зміцнення, такими як "shot peening" чи "laser peening". Технологія активно застосовується у різних галузях, таких як авіація, автомобільна промисловість, адитивне виробництво, а також для деталей у ядерній енергетиці.

У статті [7] наведено аналіз процесу деградації нержавіючої сталі 316L під впливом кавітації. Дослідження базуються на результатах чисельного моделювання (метод скінчених елементів) і порівнянні отриманих результатів із експериментальними даними. Автор розглядає вплив мікроструменевих ударів, що виникають під час колапсу кавітаційних бульбашок, на пошкодження поверхні сталі. Результати засвідчили, що швидкість мікроструменя суттєво впливає на зношування матеріалу. Разом з тим, слід зазначити, що у роботі прийнято припущення, що розмір мікроструменя і швидкість удару є незалежними і це обмежує точність моделювання. Також звертаємо увагу на те, що дослідження розглядає лише дворазовий вплив мікроструменів, хоча в реальних умовах відбуваються численні удари та цікавими були би результати за умови використання різних матеріалів для порівняння. Разом з тим, результати є важливими для прогнозування терміну служби гідротурбін, насосів і гребних гвинтів.

У роботі [8] досліджували кавітаційне руйнування гірських порід і цементних композитів у лабораторних умовах. Випробування проводилися у кавітаційній камері при температурі води 40°C та кавітаційному числі $\sigma = 0,075$. Було встановлено, що швидкість ерозії суттєво залежить від мінералогічного складу та мікроструктури матеріалів. Зокрема, пористі матеріали, такі як бетон, виявилися більш схильними до деградації під впливом кавітації, тоді як граніт і силікатний цемент продемонстрували вищу стійкість завдяки їхній здатності зупиняти поширення мікротріщин.

Мета роботи. Метою дослідження є встановлення ділянок можливого зношування у гідродинамічних апаратах статичного типу на основі результатів чисельного моделювання з

використанням експериментальних уточнених значень тиску, витрат потоку та вібраційних характеристик; проведення досліджень щодо втрати маси взірця в ділянці, що піддається найбільшому кавітаційному впливу.

Результати досліджень. Числові дослідження запропонованих моделей кавітаційних апаратів [10] виконували на основі комп'ютерного моделювання в середовищі Flow Simulation. Методика передбачала кілька ключових етапів, які забезпечили точність і достовірність отриманих результатів. Першим кроком було створення 3D-моделей апаратів. У програмному середовищі SolidWorks були спроектовані основні конструктивні елементи, зокрема ввідна камера, перешкода, конфузор, циліндрична камера, дифузор. Після цього окремі деталі були зібрані у загальну модель, що дозволило відтворити реальну геометрію пристрою. На наступному етапі експериментально визначили вихідні параметри для моделювання, зокрема тиск на вході, температуру рідини, витрата рідини. Вимірювання тиску та температури проводили за допомогою датчиків Keller 2XPR-33/10, встановленого на вході в ділянку звуження, а також двох датчиків Keller PR-33X/3 (Рис.1), розміщених в межах кавітаційної ділянки, витрату потоку - витратоміром. Схема експериментальної установки наведена на Рис.1. Отримані дані обробляли за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення Control Center Serie 30, що дозволяло не лише реєструвати вимірювання, а й візуалізувати їх у графічному форматі. Паралельно спостерігали за гідродинамікою потоку (Рис.2). Після задання початкових параметрів отриманих експериментально, виконали чисельне моделювання потоку. За допомогою програмного пакету Flow Simulation розв'язували рівняння Нав'є-Стокса з урахуванням кавітації аналізували об'єм парогазової фази та її розподіл вздовж апарата. Для аналізу вібраційних характеристик потоку використовували датчики, встановлені у ключових точках конструкції. Зокрема: K0 (перед перешкодою) – датчик 97,5 mV/g, K1 (безпосередньо за перешкодою) – 97,3 mV/g, K2 (на виході з дифузора) – 97,3 mV/g, K3 (за кавітаційним апаратом) – 103,1 mV/g. Для покращення точності вимірювань сигнал підсилювали у 10 разів. Частота дискретизації становила 100 кГц. Під час експерименту вхідний тиск підтримувався на постійному рівні протягом 2 хвилин, після чого поступово збільшувався. На наступному етапі визначали втрати маси взірця з часом, закріпленого на виході дифузора в діапазоні витрати потоку 20 - 40л/хв і тисків 0,3-0,6МПа.

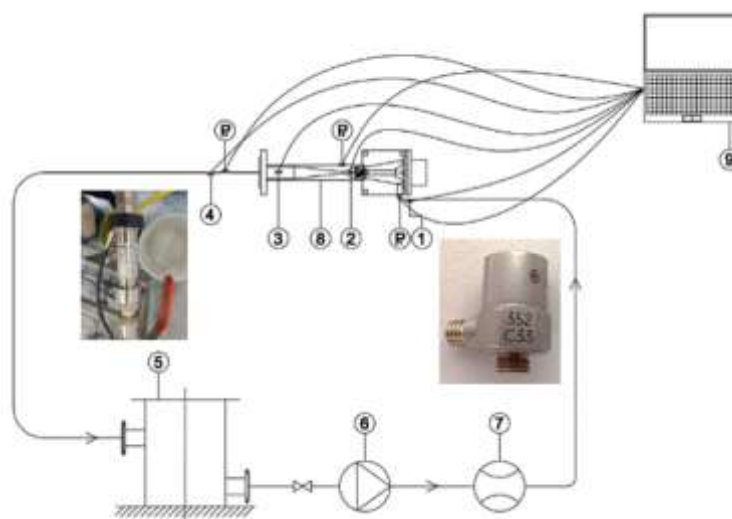
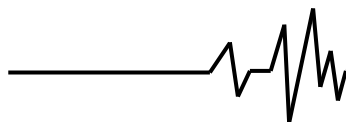


Рис.1. Схема станда та фото датчиків вимірювання тиску та вібрацій: 1, 2, 3, 4 – локація датчиків вібрацій; 5 – буферна ємність; 6 – насос; 7 – витратомір; 8 – кавітаційний модуль; P_1 , P_2 , P_3 - локація встановлення датчиків тиску.



Рис.2. Візуалізація гідродинаміки потоку.

На рис.3 наведено результати чисельного моделювання розподілу об'ємної концентрації пари у потоці при вхідному тиску $P_1=0,35\text{МПа}$ у кавітаційній моделі з конічною перешкодою.

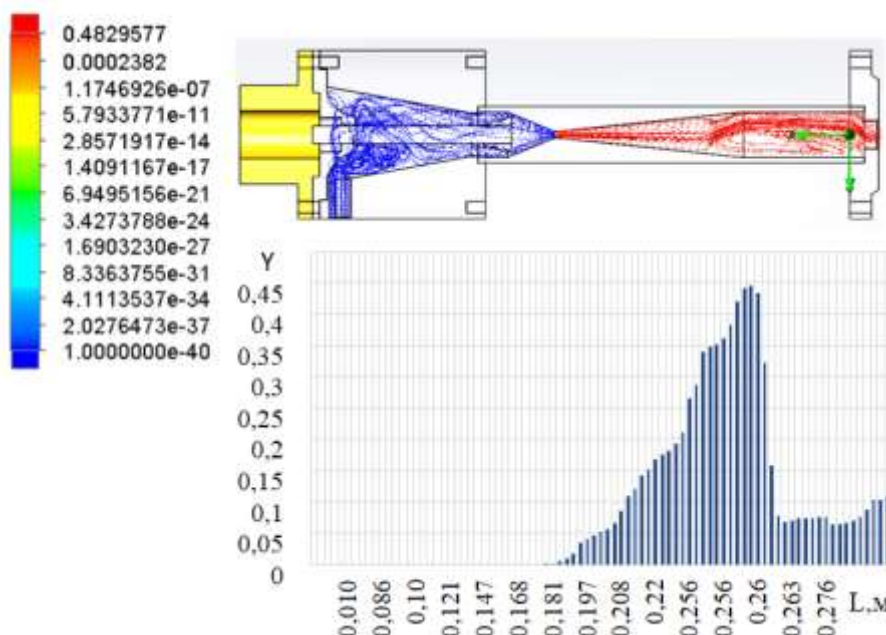
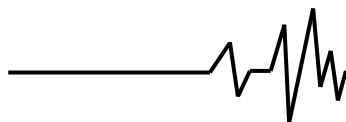


Рис.3 Розподіл об'ємної концентрації пари вздовж моделі з конусною перешкодою, $P_1=0,35\text{Мпа}$

Експериментальні усереднені значення початкових параметрів тиску на вході, за перешкодою та в дифузорі і витрати на виході з апарату наведено у табл.1., Рис.4. На рис.3 також наведено гістограму, яка відображає розподіл об'ємної концентрації пари вздовж

моделі. Найбільша концентрація спостерігається у вихідній ділянці дифузора, де може відбуватись найбільше зношення поверхні. Візуальні спостереження також засвідчили найбільшу концентрацію парової фази на виході з дифузора.



Таблиця 1. Експериментальні усереднені значення тиску та продуктивності в моделі з конусною перешкодою

P_1 , МПа	P_2 , МПа	P_3 , МПа	Q , л/хв
0,35	-0,01	0,003	20,5
0,4	-0,011	0,0032	25,3
0,5	-0,012	0,0023	28,9
0,55	-0,015	0,0021	31,5
0,6	-0,014	0,0018	36,6



Рис.4. Експериментальні результати вимірювання тиску і температури у моделі з конусною перешкодою.

Аналогічні результати були отримані для моделі зі шнековою перешкодою Рис.5, табл.2.

Таблиця 2. Експериментальні усереднені значення тиску та продуктивності в моделі зі шнековою перешкодою

P_1 , МПа	P_2 , МПа	P_3 , МПа	Q , л/хв
0,35	-0,011	0,002	21,3
0,4	-0,01	0,0022	25,5
0,5	-0,013	0,003	28,2
0,55	-0,014	0,0025	32,9
0,6	-0,015	0,0033	39,2

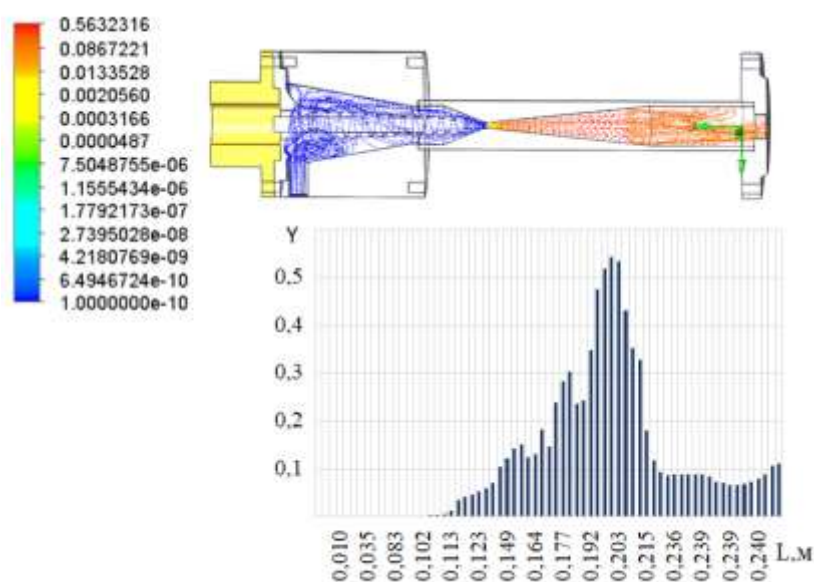
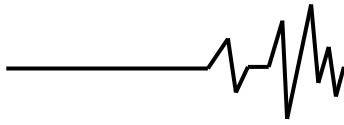


Рис.5. Розподіл об'ємної концентрації пари вздовж моделі зі шнековою перешкодою, $P_1=0,35$ МПа



Ділянка, що піддається найбільшому зношуванню була підтверджена результатами порівняння рівнів вібрацій у різних ділянках моделі і за нею (Рис.6 - Рис.10). Вимірювання показали, що найбільші значення прискорення спостерігалися на виході з дифузора (К3 – 103,1 mV/g, ряд 4), що може свідчити про інтенсивний розвиток турбулентності та вторинних потоків на виході з ділянки кавітації. На ділянці перед перешкодою (К1 – 97,3 mV/g, ряд2) рівень вібрацій залишався практично незмінним у порівнянні з показниками за перешкодою (К2 – 97,3 mV/g, ряд 3). Водночас, перед перешкодою (К0 – 97,5 mV/g; ряд1) спостерігалось незначне підвищення рівня вібрацій, що може бути пов'язане з локальними збуреннями перед входом у звужену ділянку. Підсилення сигналу у 10 разів дозволило підвищити точність вимірювань, а висока частота дискретизації (100кГц) забезпечила детальну реєстрацію динаміки змін параметрів потоку. Отримані результати також засвідчили початок кавітації за умови вхідного тиску $P_1=0,35\text{МПа}$. Важливим виявилось те, що вплив на стінки апарату почав зменшуватись при тиску 0,4МПа до $P_1=0,6\text{МПа}$, що засвідчило стабілізацію кавітаційного режиму та формування парогазової фази в центрі потоку, що є важливим з точки зору забезпечення надійної роботи апарата. Найбільший вплив на стінки спостерігався за вхідного тиску $P_1=0,35\text{МПа}$, що і підтвердили результати щодо втрати маси взірця.

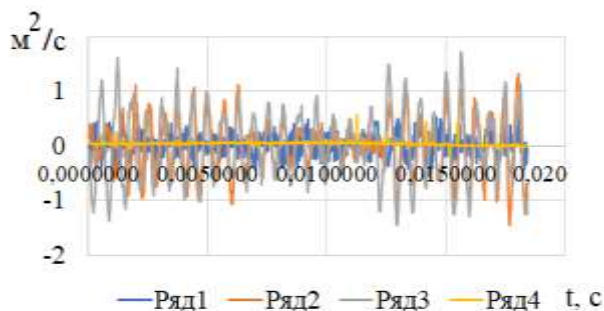


Рис.6. Результат вимірювання вібраційними датчиками $P_1=0,3\text{МПа}$: Ряд1 – К0; Ряд2 -К1; Ряд3 -К2; Ряд4 -К3.

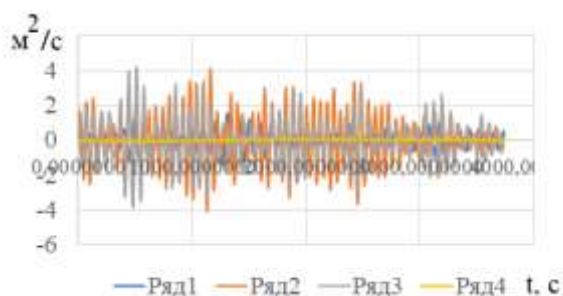


Рис.7. Результат вимірювання вібраційними датчиками $P_1=0,35\text{МПа}$: Ряд1 – К0; Ряд2 -К1; Ряд3 -К2; Ряд4 -К3.

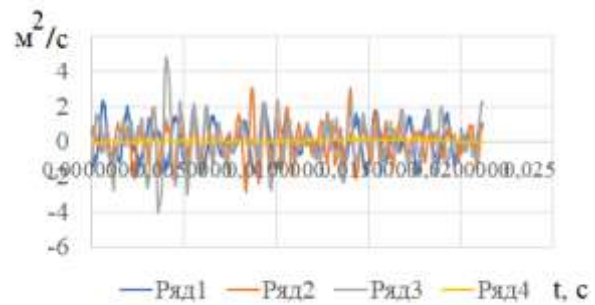


Рис.8. Результат вимірювання вібраційними датчиками $P_1=0,4\text{МПа}$: Ряд1 – К0; Ряд2 -К1; Ряд3 -К2; Ряд4 -К3.

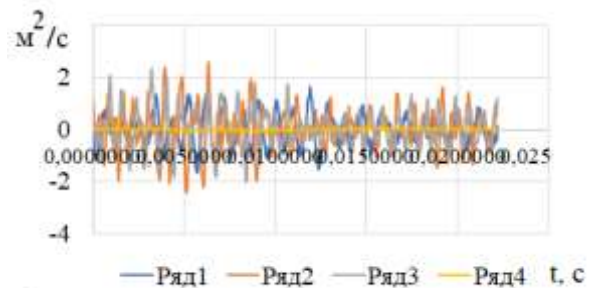


Рис.9. Результат вимірювання вібраційними датчиками $P_1=0,5\text{МПа}$: Ряд1 – К0; Ряд2 -К1; Ряд3 -К2; Ряд4 -К3.

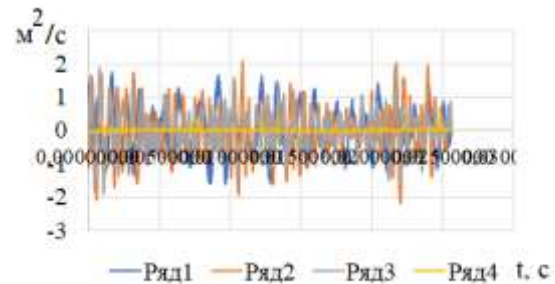
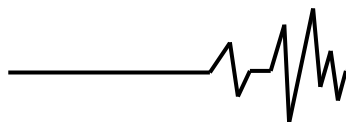


Рис.10. Результат вимірювання вібраційними датчиками $P_1=0,6\text{МПа}$: Ряд1 – К0; Ряд2 -К1; Ряд3 -К2; Ряд4 -К3.

В табл. 3 наведено результати зменшення маси взірця виготовленого зі сталі марки 40Х за різних умов роботи апарата, який був встановлений на виході з дифузора по центру потоку.



Таблиця 3. Втрата маси взірця з часом

Час (хв)	Втрата маси (г) при $P_1=350$ кПа	Втрата маси (г) при $P_1=400$ кПа	Втрата маси (г) при $P_1=500$ кПа	Втрата маси (г) при $P_1=600$ кПа
0	0	0	0	0
100	0,000391	0,0004692	0,0006256	0,00071944
200	0,0004692	0,0050048	0,00064124	0,00075072
300	0,005083	0,0051612	0,0006647	0,00076636
400	0,0052394	0,0053958	0,00068816	0,0008602
500	0,0053958	0,005474	0,00069598	0,0008602
600	0,0053958	0,005474	0,00069598	0,0008602

Спостерігалось збільшення втрати маси із зростанням вхідного тиску, що можна пояснити збільшенням об'єму парогазової фази, що формується в потоці. Важливим виявилось зменшення швидкості втрати маси з часом. Що можна пояснити тим, що на початковому етапі відбувається активне руйнування поверхневого шару матеріалу, яке супроводжується інтенсивною втратою маси. Згодом можливе утворення оксидного або деформованого шару, який частково захищає матеріал від подальшого руйнування.

Висновки:

1. Аналіз наукової літератури засвідчив, що кавітаційне зношування є критичним фактором, який впливає на довговічність гідродинамічних систем, зокрема апаратів по типу труб Вентурі. Причому інтенсивність зношування безпосередньо залежить від параметрів потоку, таких як вхідний тиск та швидкість рідини.

2. Результати чисельного моделювання та експериментів щодо вібраційних характеристик показав, що найбільша концентрація парогазової фази спостерігається у вихідній ділянці дифузора, яка для досліджуваних моделей є критичною з точки зору кавітаційного зношування.

3. Вимірювання вібраційними датчиками також засвідчили, що найбільші значення прискорення досліджуються на виході з дифузора. Це засвідчує процес схлопування кавітаційних бульбашок і вплив мікропульсацій та мікроструминок, що формуються у фазі руйнування бульбашок на стінки апарата.

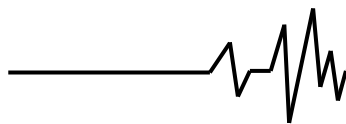
4. Порівняльний аналіз моделей труб Вентурі з конічною та шнековою перешкодами виявив, що конструкція з конусною перешкодою сприяє більш рівномірному розподілу кавітаційної ділянки, що потенційно знижує інтенсивність локального зношування.

5. Визначено, що максимальні втрати маси взірця відбувалися за умов низького вхідного тиску (0,35 МПа), тоді як при підвищенні тиску від 0,4 МПа до 0,6 МПа відбувалася стабілізація кавітаційного режиму та зміщення парогазової фази в центр потоку, що зменшувало негативний вплив на стінки апарата. Ці результати сприяють покращенню розуміння механізмів кавітаційного зношування та можуть бути використані для розробки ефективних методів його зниження, що сприятиме підвищенню

ресурсу роботи обладнання та зниженню експлуатаційних витрат. Подальші дослідження у цьому напрямку можуть бути спрямовані на оптимізацію конструкцій труб Вентурі з урахуванням новітніх матеріалів і покриттів, що зменшують вплив кавітаційного зношування.

Список використаних джерел

1. Chen Y.-M., Mongis J. Cavitation wear in plain bearing: Case study. *Mécanique & Industries*. 2005. Vol. 6, No. 3. P. 195–201. URL: <https://doi.org/10.1051/meca:2005020> (date of access: 07.04.2025).
2. Клименко І. О., Маринін В. Г., Овчаренко В. Д., Коваленко В. І., Купрін А. С., Решетняк О. М., Білоус В. А., Ростова Г. Ю. Стійкість титанових сплавів до кавітаційного зносу. *Питання атомної науки і техніки*. 2022. № 1 (137). С. 130–135. URL: <https://doi.org/10.46813/2022-137-130> (дата звернення: 07.04.2025).
3. Скиба М. Є., Олександренко В. П., Стечишин М. С., Мартинюк А. В. Кавітаційно-ерозійна зносостійкість вуглецевих конструкційних сталей. *Проблеми трибології*. 2019. № 1 (91). С. 21–29. URL: <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2019-91-1-21-29> (дата звернення: 07.04.2025).
4. Glovatskyi O., Ergashev R., Saparov A., Berdiev M., Shodiev B. Cavitation-abrasive wear working collectors of pumps. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 869, No. 4. P. 042006. URL: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/869/4/042006> (date of access: 07.04.2025).
5. Krella A. K. Degradation and protection of materials from cavitation erosion: A review. *Materials*. 2023. Vol. 16, No. 5. P. 2058. URL: <https://doi.org/10.3390/ma16052058> (date of access: 07.04.2025).
6. Soyama H. Cavitation peening: A review. *Metals*. 2020. Vol. 10, No. 2. P. 270. URL: <https://doi.org/10.3390/met10020270> (date of access: 07.04.2025).
7. Maurin A. Numerical investigation of degradation of 316L steel caused by cavitation. *Materials*. 2021. Vol. 14, No. 11. P. 3131. URL: <https://doi.org/10.3390/ma14113131> (date of access: 07.04.2025).



8. Momber A. W. Cavitation damage to geomaterials in a flowing system. *Journal of Materials Science*. 2003. Vol. 38, No. 7. P. 747–757. URL: <https://doi.org/10.1023/A:1021800812885> (date of access: 07.04.2025).

9. Guelich J. *Centrifugal pumps*. Berlin : Springer, 2010. 964 p.

10. Вітенько Д. О., Вітенько Т. М. Аналіз та порівняння гідродинаміки потоку у кавітаційних апаратах. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2024. Т. 14, № 2. С. 1–15. URL: <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2024-24-2-9> (дата звернення: 07.04.2025).

References

1. Chen, Y.-M., & Mongis, J. (2005). Cavitation wear in plain bearing: Case study. *Mécanique & Industries*, 6(3), P. 195–201 [in English].

2. Klymenko, I. O., Marynin, V. H., Ovcharenko, V. D., Kovalenko, V. I., Kuprin, A. S., Reshetnyak, O. M., Bilous, V. A., & Rostova, H. Yu. (2022). Stiikist' tytanovykh splaviv do kavitatsiinoho znosu [Resistance of titanium alloys to cavitation wear]. *Pytannia atomnoi nauky i tekhniky*, 1(137), P. 130–135 [in Ukrainian].

3. Skyba, M. Ye., Oleksandrenko, V. P., Stechyshyn, M. S., & Martyniuk, A. V. (2019). Kavitatsiino-eroziina znosostiikist' vuhletsevykh konstruktsiinykh stalei [Cavitation-erosion wear resistance of carbon structural steels]. *Problemy trybolohii*, 1(91), P. 21–29 [in Ukrainian].

4. Glovatsky, O., Ergashev, R., Saparov, A., Berdiev, M., & Shodiev, B. (2020, June). Cavitation-abrasive wear working collectors of pumps. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 869, No. 4, p. 042006). IOP Publishing [in English].

5. Krella, A. K. (2023). Degradation and protection of materials from cavitation erosion: a review. *Materials*, 16(5), 2058. [in English].

6. Soyama, H. (2020). Cavitation peening: A review. *Metals*, 10(2), 270 [in English].

7. Maurin, A. (2021). Numerical investigation of degradation of 316L steel caused by cavitation. *Materials*, 14(11), 3131 [in English].

8. Momber, A. W. (2003). Cavitation damage to geomaterials in a flowing system. *Journal of Materials Science*, 38(7), 747–757 [in English].

9. Guelich, J. (2010). *Centrifugal pumps*. Berlin: Springer [in English].

10. Vitenko, D. O., & Vitenko, T. M. (2024). Analiz ta porivniannia hidrodynamiky potoku u kavitatsiinykh aparatach [Analysis and comparison of flow hydrodynamics in cavitation devices]. *Naukovyi visnyk Tavriiskoho derzhavnogo ahrotekhnolohichnoho universytetu*, 14(2), P. 1–15 [in Ukrainian].

WEAR IN HYDRODYNAMIC DEVICES OF THE VENTURI TUBE TYPE

Hydrodynamic static-type devices are widely used in various industries, including chemical, food, pharmaceutical, and water treatment technologies. Their efficiency is based on effects related to the life cycle of vapor-gas bubbles formed under specific hydrodynamic conditions within the system. At the same time, a significant issue with such devices is the destruction of working surfaces due to cavitation erosion, which is accompanied by material loss, reduced strength, and structural changes in the material. The impact of the cavitation regime, which arises under a certain ratio of pressure and velocity, can lead to the formation of microcracks that develop into more severe damage over time.

This article has investigated certain aspects influencing cavitation wear on the walls of models with conical and screw-shaped obstacles. It has been established that the wear intensity depends on flow parameters such as inlet pressure and liquid velocity. Based on numerical modeling results, the region of vapor-gas phase formation has been identified and confirmed through experimental studies on pressure variations along the apparatus and visual observations. Additionally, the highest acceleration values on the apparatus walls have been recorded within the outlet diffuser section, where vapor-gas bubbles collapse and directly impact the walls. A comparison of the two hydrodynamic device models has shown that the use of a conical obstacle promotes a more uniform distribution of the vapor-gas phase along the diffuser, potentially reducing the intensity of local wear. It has been determined that when the inlet pressure increases from 0.4 MPa to 0.6 MPa, the hydrodynamic regime stabilizes, and the vapor-gas phase shifts toward the flow centre, which reduces its negative impact on the walls. However, the increase in mass loss of the sample due to intensified cavitation suggests a greater impact on the technological medium. The obtained results will contribute to the development of effective methods for reducing wear and enhancing the durability and efficiency of the equipment.

Keywords: vibrations, wear, hydrodynamic, modelling.

Відомості про автора

Вітенько Дмитро олегович – аспірант кафедри обладнання хачових технологій Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя (вул. Руська, 56, м. Тернопіль, 46001, Україна).

Vitenko Dmytro – PhD student at the Department of Food Technology Equipment, Ternopil Ivan Puluj National Technical University (56 Ruska St., Ternopil, 46001, Ukraine).