

Голові разової спеціалізованої вченої
ради Тернопільського національного
технічного університету
імені Івана Пулюя д.т.н., професору
Стаднику Ігореві Ярославовичу

ВІДГУК

офіційного опонента д.т.н., професора Самойчука К.О. на дисертаційну роботу Вітенька Дмитра Олеговича на тему: «Удосконалення конструкції кавітаційного апарата за результатами моделювання гідродинамічних параметрів потоку», представлену на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 13 «Механічна інженерія» за спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування»

Актуальність теми досліджень.

Інтенсифікація масообміну, диспергування та змішування належить до важливих інженерних завдань промисловості. Одним із перспективних підходів до вирішення цього питання є використання гідродинамічних кавітаційних апаратів статичного типу, що характеризуються конструктивною простотою, відсутністю рухомих елементів та широкими можливостями технологічного застосування. Водночас забезпечення стійкого й керованого кавітаційного режиму в таких апаратах залишається складною інженерною задачею. Це зумовлено суттєвою залежністю умов ініціювання та розвитку кавітації від геометрії проточної частини, конфігурації й розташування внутрішніх елементів, а також гідравлічних параметрів потоку.

Крім того, важливим обмеженням є енергоефективність процесу, оскільки інтенсифікація кавітаційних явищ, як правило, супроводжується зростанням гідравлічних втрат і, відповідно, енергоспоживання. Нераціональний вибір геометричних параметрів призводить до підвищення втрат тиску, нестабільності режимів течії та зміщення двофазної зони, що не лише ускладнює забезпечення

відтворюваності й керованості технологічного результату, але й знижує енергетичну доцільність використання таких апаратів.

Аналіз сучасних вітчизняних і зарубіжних досліджень, у тому числі європейських, свідчить про відсутність єдиної методики обґрунтованого проектування геометрії проточної частини статичних кавітаційних апаратів з урахуванням одночасно інтенсивності кавітації та енергетичної доцільності. Застосування методів обчислювальної гідродинаміки (CFD) як інструменту параметричного аналізу та обґрунтування конструктивних рішень є раціональним науково-інженерним рішенням. У зв'язку з цим, тематика дисертаційної роботи є актуальною.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.

Наукові результати, представлені в дисертаційній роботі, є достатньо обґрунтованими, оскільки отримані на основі комплексного підходу, що поєднує теоретичний аналіз, чисельне моделювання та експериментальні дослідження. Постановка задач моделювання відповідає сучасним підходам до дослідження двофазних течій і базується на використанні методів обчислювальної гідродинаміки, що дозволяє адекватно описувати розподіли тиску, швидкості та об'ємної частки парової фази.

Обґрунтованість результатів підтверджується логічною послідовністю дослідження від формування геометричних моделей і вибору фізичних припущень до отримання та узагальнення результатів моделювання. Важливо, що результати моделювання інтерпретуються не лише на рівні локальних параметрів, а й узагальнюються через інтегральні характеристики двофазності.

Достовірність отриманих результатів забезпечується їх експериментальною перевіркою та узгодженістю розрахункових і експериментальних даних за основними гідродинамічними параметрами. Валідація CFD-моделі, виконана за показниками перепаду тиску, витрати та візуальними ознаками двофазної течії, підтверджує адекватність застосованих моделей. Додатково достовірність результатів підтверджується використанням незалежних методів оцінювання технологічного ефекту, зокрема за показниками

дисперсності жирової фази при гомогенізації молока та змінами фізико-хімічних параметрів води .

Наукова новизна роботи полягає у декількох аспектах. Найбільш цікавим і значущим результатом роботи є запропонований показник питомої кавітаційної ефективності η^* . На відміну від більшості існуючих підходів, у яких інтенсивність кавітаційних явищ та гідравлічні втрати аналізуються окремо, у роботі здійснено спробу об'єднати ці характеристики в єдиний узагальнений критерій. Такий підхід дозволяє оцінювати ефективність конструкцій за співвідношенням між досягнутим кавітаційним ефектом та витратами енергії, що є більш інформативним з інженерної точки зору та придатним для порівняльного аналізу різних конфігурацій апарата. За умови належної експериментальної валідації запропонований показник може розглядатися як самостійний інструмент для обґрунтування вибору конструктивних рішень.

Окремої уваги заслуговує підхід до інтегральної оцінки двофазності, що базується на визначенні об'єму парової фази з урахуванням змінної площі поперечного перерізу проточного каналу. Такий підхід є новим, оскільки дозволяє перейти від локальних характеристик (розподілу об'ємної частки пари) до узагальненої кількісної оцінки кавітаційної активності в апараті. Це забезпечує коректніше порівняння конструкцій з різною геометрією та створює основу для формування інтегральних критеріїв оцінювання ефективності кавітаційних процесів.

Практичне значення роботи підтверджується наявністю конкретних інженерних рішень, доведених до рівня прикладного використання. Зокрема, розробка та обґрунтування конструкції карбонізатора з конусною вставкою для вузла карбонізації напоїв на Тернопільській пивоварні «Опілля» свідчить про реалізацію результатів дослідження у виробничих умовах. Аналогічно, запропонований модуль гомогенізації молока, орієнтований на використання у невеликих господарствах, є прикладом технічного рішення, адаптованого до реальних експлуатаційних вимог та обмежень.

Додатковим підтвердженням практичної значущості є отримання патентів України на корисні моделі №160839 U та №160838 U, що засвідчує новизну та

придатність запропонованих конструктивних рішень до впровадження. Окремо слід відзначити використання результатів роботи в освітньому процесі, що сприяє їх апробації та поширенню серед майбутніх фахівців. У сукупності це свідчить про прикладний характер отриманих результатів та їхню орієнтацію на практичне використання.

Оцінка змісту дисертації, її завершеності та дотримання академічної доброчесності

Дисертаційна робота є завершеним науковим дослідженням, у якому послідовно вирішено поставлене завдання удосконалення конструкції кавітаційного апарата на основі моделювання гідродинамічних параметрів потоку. Зміст дисертаційної роботи характеризується логічною послідовністю викладу матеріалу, що охоплює постановку задачі, її чисельну реалізацію, експериментальну перевірку та доведення результатів до практичного використання.

Наукові положення та результати дослідження відповідають спеціальності 133 «Галузеве машинобудування», оскільки спрямовані на розроблення й удосконалення конструкцій технологічного обладнання проточного типу та встановлення закономірностей його роботи на основі моделювання гідродинамічних процесів.

Робота побудована логічно та послідовно і складається зі вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел і додатків. Основний текст дисертації викладено на 167 сторінках, загальний обсяг становить 233 сторінки, у тому числі 75 рисунків, 19 таблиць і 149 найменувань використаних джерел .

Дисертація належним чином оформлена, містить достатню кількість ілюстративного матеріалу, що підтверджує результати досліджень та сприяє їх кращому розумінню. Таблиці, рисунки та графічні залежності використані доцільно і відповідають змісту роботи.

Обсяг і структура дисертації відповідають встановленим вимогам до наукових робіт такого рівня, а використані джерела охоплюють як класичні, так і сучасні дослідження за тематикою роботи .

Академічна доброчесність у роботі дотримана. Автором наведено коректні посилання на використані літературні джерела, у тому числі на власні публікації. Ознак некоректних запозичень чи плагіату не виявлено. Результати досліджень апробовані у фахових наукових виданнях та наукових конференціях.

У цілому дисертаційна робота є завершеним науковим дослідженням, виконаним на належному науковому та методичному рівні, відповідає вимогам академічної доброчесності та заслуговує позитивної оцінки.

Мова та стиль викладення результатів

Дисертаційна робота викладена зрозуміло і послідовно. Текст добре структурований, що дозволяє без ускладнень простежити логіку дослідження та отримані результати.

Мова відповідає науковому стилю, термінологія використана коректно і в цілому узгоджується з прийнятою у галузі гідромеханіки та машинобудування. Позначення та введені поняття подані з поясненнями і не викликають труднощів у сприйнятті.

Теоретичні положення, результати моделювання та експериментальні дані викладені достатньо чітко. Формули, рисунки і таблиці пов'язані з текстом і використовуються для пояснення та підтвердження результатів.

Загалом стиль викладення є логічним і зрозумілим для фахівців відповідного профілю, а мова дисертації відповідає вимогам до наукових робіт такого рівня

Короткий аналіз основного змісту дисертаційної роботи

Дисертація є завершеною науковою працею, логічно структурованою та методично обґрунтованою.

Вступ чітко окреслює мету, завдання, об'єкт і предмет дослідження, містить обґрунтування наукової новизни та практичної значущості результатів.

У першому розділі представлено критичний огляд сучасного стану досліджень у галузі гідродинамічної кавітації та кавітаційних апаратів. Автором проаналізовано фізичні передумови виникнення кавітації, механізми зародження, росту та колапсу кавітаційних бульбашок, а також їх динаміку на основі класичних рівнянь Релея-Плессета та його модифікацій. Окрему увагу

приділено узагальненню критеріїв оцінювання інтенсивності процесу, зокрема числу кавітації як ключовому безрозмірному параметру, що дозволяє ідентифікувати режими течії та порівнювати ефективність різних конструкцій і умов роботи апаратів. У розділі виконано широкий аналіз практичного застосування гідродинамічної кавітації. Зокрема, розглянуто її використання у технологіях водоочистки, у харчовій промисловості, а також у фармацевтичних і хімічних процесах. Наведені приклади технологічних схем і апаратів підтверджують практичну значущість досліджуваної тематики та її міжгалузевий характер.

Важливою складовою розділу є аналіз підходів до моделювання кавітаційних процесів. Автором розглянуто аналітичні моделі, що описують динаміку одиничної бульбашки (Релея-Плессета, Келлера-Міксіса, Гілмора), визначено їх область застосування та обмеження. На основі аналізу здобувач обґрунтовує доцільність використання методів обчислювальної гідродинаміки (CFD), для визначення розподілів тиску, швидкості та об'ємної частки парогазової фази в робочому об'ємі апарата.

У другому розділі здобувач наводить методологію досліджень, що поєднує конструктивний аналіз, чисельне моделювання та експериментальну перевірку. В розділі детально описана конструкція кавітаційного зі змінними вставками та обґрунтовано вибір геометричних параметрів проточної частини з позиції мінімізації гідравлічних втрат і забезпечення стабільності кавітації

Слід зазначити, що математична постановка задачі є коректною оскільки здобувач застосовує RANS-підхід з моделлю турбулентності та однорідну рівноважну модель суміші, що є виправданим для інженерного порівняння конструктивних рішень. Здобувач наводить широкий діапазон режимних параметрів експериментального стенду, а обрані методики оцінки ефективності обробки середовищ відповідають меті дослідження та сучасним стандартам.

Розділ 3 присвячено моделюванню гідродинамічних параметрів і кавітаційних характеристик потоку в апараті. Здобувач представив побудову тривимірної моделі проточної частини, обґрунтував чисельну постановку задачі та початкові і граничні умови моделювання, що забезпечують відтворення

гідродинаміки внутрішньої течії .

З позицій особливостей кавітаційної гідродинаміки основну увагу приділено аналізу розподілів швидкості, статичного тиску та числа кавітації вздовж осі апарата. Показано, що формування області мінімального тиску в зоні горловини визначає умови ініціації кавітації, тоді як подальше відновлення тиску в дифузори обмежує просторову протяжність двофазної області. Такий підхід дозволяє інтерпретувати кавітаційний процес як наслідок локального перетворення енергії потоку та формування критичних градієнтів тиску.

Важливим є аналіз впливу геометричних параметрів, зокрема діаметра горловини, на умови досягнення кавітаційного режиму, що узгоджується з класичними уявленнями про роль швидкісного напору у зниженні статичного тиску. Порівняльне дослідження базової конфігурації та варіантів із вставками дозволяє оцінити зміну структури течії, зокрема локальні ефекти прискорення та перерозподілу потоку, які впливають на формування кавітаційної зони.

Окремо слід відзначити виконану валідацію результатів моделювання, що підтверджує узгодженість розрахункових і експериментальних даних та свідчить про адекватність відтворення основних гідродинамічних закономірностей кавітаційного потоку.

У розділі 4 дисертаційної роботи виконано комплексний аналіз удосконалених конструкцій кавітаційних апаратів з точки зору їх енергетичної ефективності та технологічної дії, зокрема на прикладі процесу гомогенізації молока. Ступінь диспергування жирової фази використано як індикатор інтенсивності кавітаційного впливу, оскільки їх руйнування зумовлене дією мікроструминок, ударних хвиль та імпульсних навантажень при колапсі кавітаційних бульбашок.

Позитивним є застосування комплексного підходу до аналізу дисперсного складу із використанням розподілів за кількістю та об'ємом і характеристик d_{50} , d_{90} , d_{max} , що дозволило коректно оцінити якість гомогенізації. Обґрунтовано показано, що саме об'ємний розподіл і наявність крупної фракції визначають ефективність процесу.

Отримані результати свідчать про суттєве підвищення ступеня

диспергування під дією кавітаційної обробки: встановлено зміщення розподілу в область дрібних фракцій та зниження характерних діаметрів. Важливим є доведення того, що застосування конструктивних вставок забезпечує підвищення однорідності емульсії. Зокрема, конусна вставка (для конфігурації з $d_g = 7$ мм) ефективно обмежує крупну фракцію (зменшення d_{90} і d_{max}), тоді як шнекова вставка (для конфігурації з $d_g = 5$ мм) забезпечує найбільш якісну гомогенізацію (практично повне усунення жирових кульок розміром більше 2 мкм).

Суттєвою перевагою є введення показника k_{50} , що дозволило кількісно оцінити інтенсивність процесу. Показано, що апарат з горловиною 5 мм має на 65% вищу питому ефективність гомогенізації, що підтверджує визначальну роль інтенсивності кавітаційного впливу.

У розділі 5 наведено технічні рішення щодо практичного використання отриманих наукових результатів у виробництві. Розглянуто удосконалення карбонізатора на базі труби Вентурі та розроблення модульної системи гомогенізації молока для невеликих фермерських господарств.

На основі аналізу базової конструкції карбонізатора запропоновано конструктивне рішення у вигляді конусної вставки з тангенційними каналами, яке забезпечує зменшення ефективного прохідного перерізу, формування високошвидкісного потоку та інтенсифікацію міжфазної взаємодії за рахунок поєднання турбулентного переносу і гідродинамічних імпульсних впливів.

Здобувачем виконано необхідні конструктивні та гідродинамічні розрахунки удосконаленої конструкції, визначено параметри потоку в зоні інжекції CO_2 , оцінено мінімальний статичний тиск та перевірено умови досягнення заданої концентрації розчиненого газу з урахуванням рівноважних залежностей. Показано, що запропоноване рішення забезпечує підвищення інтенсивності карбонізації.

Для задачі гомогенізації молока розроблено модульний принцип організації процесу, що передбачає використання паралельно встановлених апаратів у циркуляційному контурі. Обґрунтовано основні параметри роботи системи, зокрема витрату, тиск, кількість модулів та кратність рециркуляції, які

забезпечують досягнення необхідного рівня гідродинамічного впливу. Оцінка енергетичних витрат та економічної доцільності показала, що впровадження удосконалених конструктивних рішень дозволяє підвищити ефективність процесів обробки при прийнятному рівні енергоспоживання та забезпечує економічний ефект за рахунок зменшення витрат робочих середовищ. Технічна новизна запропонованих конфігурацій апарата підтверджено патентами на корисні моделі та впровадженням на пивоварні Опілля та в освітньому процесі Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя.

Загалом дисертація характеризується цілісністю, логічною послідовністю викладення матеріалу та достатнім рівнем узагальнення результатів та відповідає спеціальності 133 Галузеве машинобудування.

Повнота викладу наукових положень в опублікованих працях.

За результатами дисертаційного дослідження здобувачем опубліковано 11 наукових праць, які в цілому забезпечують достатнє розкриття основних положень роботи. До їх складу входять 4 статті у фахових наукових виданнях України, 5 тез доповідей на міжнародних науково-практичних конференціях, а також 2 патенти на корисні моделі (№160839 U та №160838 U), які підтверджують практичну новизну запропонованих конструктивних рішень.

Опубліковані праці охоплюють усі основні розділи дисертації від теоретичного обґрунтування і CFD-моделювання до експериментальної верифікації та інженерного впровадження результатів і достатньо повно відображають наукові положення та результати, що виносяться на захист. У працях, опублікованих у співавторстві, чітко зазначено особистий внесок здобувача, що відповідає вимогам до кваліфікаційних наукових праць.

У цілому рівень оприлюднення результатів є достатнім і відповідає вимогам, що ставляться до дисертацій на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування».

Зауваження до дисертаційної роботи

1. Слід уточнити вибір об'єкту та предмету досліджень, адже предмет – це область всередині об'єкта. З цієї точки зору «закономірності впливу геометрії» доцільно віднести до об'єкту досліджень, а «конструкцію

кавітаційного апарату» - до предмету.

2. Пункт 6 практичного значення отриманих результатів потребує корекції: публікація патенту на корисну модель не є підтвердженням практичної готовності до впровадження.

3. На с. 36 (рисунок 1.1.3) замість струминного гомогенізатора показана машино-апаратурна схема гомогенізації молока з роторно-пульсаційним апаратом.

4. В останньому абзаці підрозділу 1.1.2 (с. 38) зроблено висновок про актуальність розвитку технології гідродинамічної кавітації. Але описані вище приклади застосування гідродинамічної кавітації в різних галузях промисловості не підтверджують отриманий висновок (потребують аналізу недоліків наведених технологій та апаратів).

5. Слід уточнити висновок про те, що експериментальні витрати «добре корелюються з теоретичними даними» (с. 83): конкретизувати який саме параметр обрано для визначення ступеня кореляції і чому дорівнюють його значення.

6. У розділі 5 при обґрунтуванні удосконаленої конструкції карбонізатора введено конусну вставку з 10 тангенційними каналами прямокутного перерізу (3×8 мм), однак не наведено обґрунтування вибору саме цієї геометрії. Зокрема, відсутній аналіз впливу кількості каналів, їх глибини та ширини на ефективну площу прохідного перерізу, рівень турбулізації потоку та інтенсивність диспергування газової фази.

7. Оскільки наразі відсутній затверджений стандарт визначення якості гомогенізації молока, то для цього доцільно використати порівняння дисперсних показників молочного жиру після обробки в клапанних гомогенізаторах (при встановлених технологією режимах його роботи) та розробленому кавітаційному апараті.

8. Основним показником, який характеризує енергоефективність гомогенізатора є питомі енерговитрати, тому слід навести їх значення при промисловому використанні запропонованих кавітаційних апаратів.

Зазначені зауваження мають рекомендаційний характер і не знижують

загальної позитивної оцінки роботи.

Загальний висновок

Дисертаційна робота Вітенька Дмитра Олеговича є завершеним науковим дослідженням, у якому вирішено актуальне науково-практичне завдання удосконалення конструкції кавітаційного апарата на основі моделювання гідродинамічних параметрів потоку.

За рівнем наукової новизни, обґрунтованістю результатів, практичною значущістю та оформленням робота відповідає вимогам, що ставляться до дисертацій на здобуття ступеня доктора філософії, а її автор заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування».

Завідувач кафедри обладнання переробних
і харчових виробництв імені
професора Ф.Ю. Ялпачика
Таврійського державного агротехнологічного
ніверситету імені Дмитра Моторного,
доктор технічних наук, професор



Кирило САМОЙЧУК

Підпис Самойчука К.О.

ЗАСВІДЧУЮ

Начальник відділу кадрів




Катерина ГАНЧУК