

## ВІДГУК

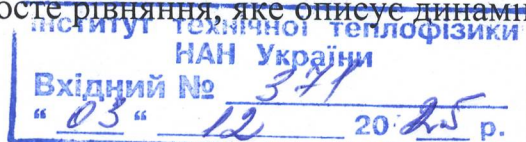
офіційного опонента на дисертацію “Розвиток наукових основ застосування методу гідродинамічної кавітації при обробці і дегазації рідин та водоочищенні”, представленої на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук Целень Богданом Ярославовичем за спеціальністю 05.14.06 - технічна теплофізика та промислова теплоенергетика

Дисертаційне дослідження, яке сприяє створенню нових енергоефективних технологій для обробки і очищення рідин є одним з пріоритетних напрямків світових наукових досліджень і відповідає сучасним вимогам промислового виробництва. Актуальність роботи підтверджується її виконанням в рамках наукових досліджень у відповідності з науковою тематикою “Розроблення технічних засад нової високоефективної технології спалювання штучних палив з твердих побутових відходів та біомаси у когенераційних енергоустановках з використанням водню, кисню, синтетичного газу та біометану для забезпечення енергетичної безпеки України” Інституту технічної теплофізики НАН України і безпосередньо пов’язана з десятьма державними темами, у яких автор брав участь як відповідальний виконавець.

Метою роботи є розвиток наукових основ застосування механізмів гідродинамічної кавітації в багатозфазних дисперсних середовищах в процесах дегазації рідин, водоочищення, створення альтернативних видів палива на основі теоретичних і експериментальних методів наукових досліджень. Для досягнення поставленої мети було поставлено і виконано відповідні завдання. Об’єктом дослідження встановлено процеси обробки, дегазації та очищення рідин, що здійснюються із застосуванням гідродинамічної кавітації, а предметом дослідження – фізико-хімічні та гідродинамічні закономірності впливу гідродинамічної кавітації на ефективність дегазації, обробки та очищення рідин, а також методи моделювання та інтенсифікації цих процесів.

В роботі застосовано сучасні чисельні методи рішення диференціальних рівнянь та експериментальних досліджень.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у вперше виявленому ефекті розбіжності двох пульсуючих в акустичному полі різних за розміром бульбашок, що суперечить відомому закону Б’єркнеса про силову взаємодію пульсуючих бульбашок і вносить свій внесок в розуміння процесів акустичної кавітації, зокрема механізму акустичної дегазації рідини та визначено критерій переходу, пульсуючих в ультразвуковому полі двох різних за розміром бульбашок, від режиму їх сходження до режиму їх розбіжності. На основі експериментальних досліджень та теоретичного аналізу моделі динаміки бульбашкового ансамблю механізмів кавітаційної обробки дисперсних рідинних сумішей в процесах водоочищення та створення водовугільних суспензій дістало подальший розвиток наукове обґрунтування методу інтенсифікації цих механізмів, який базується на застосуванні сукупності бульбашок, які динамічно розвиваються в потоці рідини, що проходить через гідродинамічний кавітаційний реактор. За допомогою моделі динаміки одиначної бульбашки проведено моделювання динаміки парогазових бульбашок у стислій рідині з урахуванням ефектів сферичного гідравлічного удару. На основі модифікації рівняння Релея–Плесета вперше виведено просте рівняння, яке описує динаміку



одиночної бульбашки в стисливій рідині. В модифіковане рівняння Релея–Плесета введено лише один параметр – коефіцієнт адіабатичної стисливості рідини  $\beta_{ad}$ , що залежить від температури і дає можливість більш точно оцінити величину стисливості рідини на границі фаз. Вперше встановлено критерій незворотної деформації та подальшого руйнування рідинних та газових дисперсій в зсувних течіях  $(a/R)cr=2,2$ , який не залежить ні від теплофізичних властивостей суцільної та дисперсної фаз, ні від числа Рейнольдса, ні від величини зсувних напружень, і може розглядатися як фізична константа. Представлена модель здатна передбачати характер деформування крапель і умови їх руйнування в зсувних течіях при відомих режимних параметрах з більшим ступенем точності, ніж існуючі емпіричні співвідношення. Вперше отримано просте співвідношення для оцінки кількості повітряних мікробульбашок в одиниці об'єму води залежно від їх радіуса на базі узагальнення сукупності відомих експериментальних даних щодо вмісту вільного повітря у воді. Вперше досліджено вплив концентрації мікробульбашок в рідині і їх початкового радіуса на кінетику пароутворення та визначено умови для інверсії фаз в потоці парогазорідинної суміші. Дістало подальший розвиток застосування способу гідродинамічної кавітаційної дегазації рідини для нейтралізації кислого конденсату продуктів згоряння природного газу. Встановлено, що для ефективного перебігу процесу дегазації потрібно забезпечити гранично високу швидкість зниження тиску в рідині до мінімальних негативних значень, ініціюючи зростання найменших газових зародків шляхом встановлення необхідного значення тиску на вході в сопло, вибору оптимального діаметра горловини сопла і підтримання мінімального значення тиску на виході із сопла Вентурі. На основі модифікації моделей динаміки одиночної бульбашки та динаміки бульбашкового ансамблю створено модель кавітаційної дегазації рідини, проведено обчислювальні експерименти із деаерації води з використанням сопла Вентурі та роторно-пульсаційного апарата як гідродинамічного кавітаційного реактора, які забезпечують можливість генерувати більше бульбашок і збільшувати час їх перебування в дифузорі перед входом в завантажувальну вакуумну камеру. Практичне значення одержаних результатів полягає у реалізації кавітаційних механізмів принципу дискретно-імпульсного введення енергії (ДІВЕ) у енергоефективному обладнанні для обробки і очищенні рідин, створенні дослідно-промислових стендів для дослідження перебігу процесу обробки і дегазації рідин з гідродинамічними кавітаційними реакторами на базі сопла Вентурі і роторно-пульсаційного апарата, дослідно-промислового стенду для дослідження впливу гідродинамічної обробки з використанням модифікованого пульсаційного диспергатора для готування водовугільного палива. Розроблено відповідні методики інженерних розрахунків елементів конструкції обладнання, лабораторних стендів та отримано ряд охоронних документів.

Особистий внесок здобувача носить чільний характер в усіх сумісних публікаціях від ідеї, постановки завдань до їх реалізації а основні результати дисертаційної роботи, що виносяться на захист, отримані автором самостійно. Матеріали дисертаційного дослідження багаторазово схвально апробовано на багатьох міжнародних науково-технічних конференціях з різною географією

міст в Україні, Польщі, а кількість і якість публікацій за темою дослідження повністю відповідають формальним ознакам. За структурою дисертаційна робота складається зі вступу, семи розділів, висновків, списку використаних літературних джерел з 470 найменувань та п'яти додатків. Загальний об'єм дисертаційної роботи складає 338 сторінок машинописного тексту. Робота містить 102 рисунки та 38 таблиць.

*Вступ* роботи за формою відповідає встановленим вимогам, а за змістом темі дисертаційного дослідження.

*Перший* розділ присвячено аналізу сучасного стану досліджень кавітаційних процесів та явищ починаючи від основних понять і визначень, умов ініціювання кавітаційних процесів, різновидів кавітації таких як акустична, гідродинамічна, парова, електророзрядна, лазерна, та відповідного кавітаційного обладнання-гідродинамічні реактори, реактор з діафрагмою, реактор на основі сопла Вентурі, ротаційні гідродинамічні реактори, а також лабораторні експериментальні стенди з дослідження процесів гідродинамічної кавітації. Проаналізовано механізми гідродинамічної кавітації- симетричний колапс, асиметричний колапс, ерозійне руйнування твердих поверхонь та моделі гідродинамічних процесів кавітації у каналах. Приведено критичний аналіз сучасних теоретичних та експериментальних методів досліджень дегазації рідини та охоронних документів. Сформульовано мету і завдання дослідження.

За формою та за змістом (по суті) вступу та *першого* розділу є кілька зауважень. 1. В умовних позначеннях слід було б привести біля позначень фізичних величин їх розмірності. 2. Аналіз літературних джерел за темою дослідження слід було б виконати більш системно. За схемою- короткий опис ідеї методу, переваги та недоліки, перспективи розвитку досліджень та місце вказаного методу у дисертаційному дослідженні. 3. Слід було б привести класифікацію існуючих методів за способом виникнення явищ кавітації у вигляді схеми з визначеними об'єктами дослідження у даній роботі.

*Другий* розділ присвячено створенню і застосуванню моделей кавітації. Приведено основні положення принципу ДІВЕ і доведено що кавітація є дієвим механізмом ДІВЕ. Проаналізовано напрямки розвитку концепції і математичні моделі кавітації на основі концепції ДІВЕ. Описані математичні моделі гідродинаміки одиничної бульбашки та їх ансамблю, у тому числі із врахуванням стисливості рідини. Розглянуто моделі кінетики кавітаційного закипання рідини, активації газових мікрозародків, гідродинаміки кавітаційних бульбашок в стисливих рідинах на основі механізму гідравлічного удару та кінетики кавітаційного закипання рідини. Виконано термодинамічний аналіз процесів ізотермічного та ізобаричного закипання рідини та досліджено умови порушення рівноваги в системі “парогазові бульбашки – рідина” в процесі кавітаційного закипання в ізотермічному режимі для критичного тиску та критичного радіуса активованих бульбашок. Виконано моделювання сопла Вентурі на основі загального розрахунку розподілу тиску і швидкості в потоці рідини по довжині сопла та моделювання процесів в роторно-пульсаційному апараті із руйнуванням дисперсій в каналах і зазорах апарата і процесів деформування та руйнування дисперсій в зсувних течіях та течії рідини через радіальні канали апарата.

До *другого* розділу є зауваження по суті. 1. При термодинамічному обґрунтуванні принципу ДІВЕ розглядаються два режими еволюції парогазової

бульбашки – при поступовій зміні температури рідини, або при раптовій зміні її тиску, що є ідеалізовано і при цьому не обговорюється реальний ізобарно-ізотермічний режим еволюції (стор.130-131). 2. В підпідрозділі “2.1.2. Апарати створені за принципом ДІВЕ” (стор.131) слід було б детальніше описати механізм втілення методу у конструктивні особливості апаратів. 3. В підпідрозділі “2.2.1. Система рівнянь моделі динаміки одичної бульбашки” слід було б привести рівняння які описують умови однозначності і ясніше вказати відносно яких невідомих величини ця система рівнянь розв’язується.

У *третьому* розділі досліджено застосування кавітаційних процесів для інтенсифікації гідродинамічного впливу при обробці рідин. Наведено основні технічні характеристики застосованого роторно-пульсаційного апарату (РПА) як кавітаційного реактора. Досліджено вплив гідродинамічної обробки на диспергування водовугільної суспензії. Проаналізовано сучасний стан існуючих способів і обладнання для отримання водовугільного палива. Приведено опис експериментальної бази та методики проведення експерименту, а також результати експериментальних досліджень та їх обговорення. Досліджено вплив гідродинамічної обробки з використанням пульсаційного диспергатора як альтернативи РПА для готування водовугільного палива. Описано експериментальну базу та методики проведення експерименту та обговорено результати експериментальних досліджень. Досліджено вплив гідродинамічної обробки на зміну рН, концентрацію іонів кальцію і жорсткість води. Проаналізовано сучасний стан проблеми видалення гідрокарбонату кальцію з води та зниження її загальної жорсткості. Приведено опис експериментальної бази, методики проведення експерименту, результати експериментальних досліджень та їх обговорення.

До *третього* розділу є зауваження по суті. В приведених експериментальних дослідженнях відсутнє чітке планування експериментів та визначення факторів, і відповідно ряд графічних залежностей побудовано на основі разових значень вимірюваних величин, а не на значеннях принаймні трьох вимірювань. Наприклад графічна залежність динамічної в’язкості від масової концентрації дисперсної фази (рис. 3.9).

*Четвертий* розділ присвячено розрахункам обладнання для здійснення операцій кавітаційної дегазації рідин. Виконано моделювання сопла Вентурі як кавітаційного дегазатора на основі розрахунків раціональної геометрії, оптимального діаметра горловини і режимів роботи з об’ємними витратами рідини через сопло. Для роторно-пульсаційного апарату як гідродинамічного кавітаційного реактора дегазації рідин описано особливості зміни тиску в рідині у вихідному перерізі статора та руйнування газових дисперсій під дією зсувних напружень в міжциліндрових зазорах. Описано алгоритм розрахунку газовмісту рідини для визначення загального числа бульбашок в одиниці об’єму рідини та об’ємного вмісту газу в рідині. Виконано розрахунок сопла Вентурі як кавітаційного дегазатора на основі обчислювальних експериментів і розрахунок параметрів роторно-пульсаційного апарату дослідного зразка установки кавітаційної дегазації рідини та проаналізовано отримані результати.

До *четвертого* розділу є зауваження по суті. Слід було б описати фізико-хімічні перетворення, наприклад на рівні хімічних реакцій, процесу дегазації

рідини при використанні кавітаційного реактора на базі сопла Вентурі та кавітаційного реактора на базі роторно-пульсаційного апарату.

У *п'ятому* розділі приведено експериментальні дослідження процесу дегазації рідини із застосуванням гідродинамічних кавітаційних реакторів на основі сопла Вентурі і роторно-пульсаційного апарату. Приведено методику експериментальних досліджень та проаналізовано отримані результати зміни величини газовмісту водневого показника і температури рідини від тривалості її обробки.

У *шостому* розділі приведено результати дослідження процесу нейтралізації кислого конденсату продуктів згоряння природного газу на основі аналізу механізму утворення кислого конденсату з діоксидом вуглецю у воді. Проведено повний комплекс теоретичних та експериментальних досліджень, від постановки задачі до отриманих результатів та їх аналізу, зміни величини водневого показника і температури конденсату продуктів згоряння природного газу від тривалості його обробки та зберігання.

До *шостого* розділу є зауваження по суті. Необхідно було б доповнити аналіз механізму утворення кислого конденсату продуктів згоряння природного газу і нейтралізації кислотності на рівні хімічних перетворень і обґрунтувати ріст величини водневого показника рідини після її обробки (Висновок 6.7 на стор.326)

*Сьомий* розділ присвячено промислому застосуванню обладнання та практичним рекомендаціям впровадження інноваційного обладнання для безреагентної нейтралізації кислого конденсату продуктів згоряння природного газу на основі визначення продуктивності, фізико-хімічних параметрів рідини до і після обробки. Виконано техніко-економічний аналіз ефективності запропонованого способу безреагентної нейтралізації кислого конденсату та використання обладнання для отримання універсального водовугільного палива і зниження жорсткості води.

До *сьомого* розділу є зауваження по суті. Техніко-економічну ефективність запропонованого способу безреагентної нейтралізації кислого конденсату необхідно було б рахувати на основі узагальнених рівнянь рентабельності, окупності, тощо. Не зрозуміло на якій основі отримано результат, цитата “Економічний ефект для однієї газової котельної з потужністю близько 20 МВт за рахунок використання кислого конденсату з врахуванням вартості водопровідної води і витрат на її підготовку становитиме приблизно 200 тис. грн. на протязі року.” кінець цитати.

В цілому по роботі є зауваження за її змістом.

1. Робота носить системний характер, проте слід було б конкретніше у кожному розділі формулювати проміжну мету дослідження та, відповідно, висновки до розділу з критичним як конкретним так і узагальнюючим аналізом в контексті комплексного підходу до розвитку наукових основ застосування методу гідродинамічної кавітації.

2. Зустрічаються види мовних помилок. Наприклад стилістичні помилки у підписах під залежностями і т.д.

До переважаючої, сильної, сторони роботи необхідно віднести наукові дослідження та отримані результати на основі верифікації теоретичних і експериментальних даних.

Достовірність отриманих результатів у теоретичних і експериментальних дослідженнях не викликає сумніву. За текстом дисертації є посилання на усі літературні джерела. Текст дисертації читається легко і зрозуміло, хоча дещо переобтяжений кількістю результатів теоретичних та експериментальних досліджень. Структура, зміст і обсяг дисертації відповідає встановленим вимогам і являє собою завершену структуровану науково - дослідну роботу з поєднанням фундаментальних і прикладних теоретичних та експериментальних досліджень за результатами яких отримано нові науково обґрунтовані напрями розвитку методів гідродинамічної кавітації для теплових технологій і суміжних галузей економіки.

Тексти дисертації і автореферату є ідентичними за змістом, і у авторефераті представлено основні положення дисертації. Висновки дисертації є достатньо обґрунтованими і мають високу цінність для розвитку наукових основ застосування методу гідродинамічної кавітації при обробці і дегазації рідин та водоочищенні.

Вказані зауваження не знижують, в цілому, якість наукових досліджень та отриманих результатів. Дисертація повністю відповідає встановленим вимогам до докторських дисертацій, а автор Целень Богдан Ярославович заслуговує присвоєння йому наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.14.06 - технічна теплофізика та промислова теплоенергетика.

Офіційний опонент, декан факультету інженерних систем та екології  
Київського національного університету будівництва  
і архітектури, доктор технічних наук, професор

 Олександр ПРИЙМАК

Підпис Олександра ПРИЙМАКА засвідчую  
секретар Вченої ради КНУБА



 Микола КЛИМЕНКО