

ВІДГУК

на дисертаційну роботу Целеня Богдана Ярославовича «Розвиток наукових основ застосування методу гідродинамічної кавітації при обробці і дегазації рідин та водоочищенні»,

представленої на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук зі спеціальності 05.14.06 – технічна теплофізика та промислова теплоенергетика

Актуальність теми

Продовж останніх років у світі спостерігається тенденція широкого використання кавітації для прискорення тепломасообмінних, гідродинамічних, біохімічних мікромасштабних процесів та для енергетичного впливу на структуру сировини і біологічні об'єкти, пошуку нових можливостей керування процесами на мікро- та нанорівні та застосовування принципово нових нетрадиційних методів інтенсифікації таких процесів.

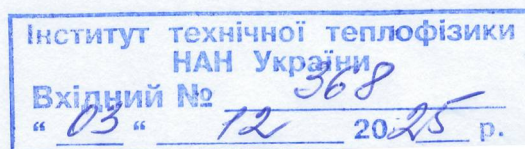
Гідродинамічна кавітація забезпечує високу ефективність, універсальність і масштабованість та розглядається як більш дешева альтернатива акустичній кавітації для промислового застосування у різних переробних галузях промисловості. Достовірний аналіз механізмів кавітації ускладнюється труднощами проведення експериментальних досліджень в часовому та просторовому наномасштабах та відсутністю узагальнюючих математичних моделей з максимальним урахуванням визначальних фізичних факторів тому робота, яка присвячена вирішенню цих питань є актуальною.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації, їх достовірність

Аналіз поданої до захисту дисертації та публікацій дисертанта дозволяє дійти висновку, що наукова обґрунтованість і достовірність викладених у них результатів забезпечується використанням загальноприйнятих розрахункових методик, що базуються на класичних аналітичних та чисельних підходах, чітким визначенням об'єкту та предмету дослідження, мети і завдань дисертаційної роботи, системним дослідженням та узагальненням результатів наукових розробок вітчизняних та зарубіжних фахівців з тепломасообміну та гідродинаміки на мікрорівні.

Наукові положення дисертаційної роботи є достатньо обґрунтованими. Сформульовані висновки є конкретними та стосуються важливих аспектів гідродинамічної кавітації при обробці і дегазації рідин та водоочищенні.

Наукові результати та положення дисертаційної роботи знайшли практичне використання.



Новизна наукових положень, висновків і рекомендацій дисертації

Наукові положення, висновки, які характеризуються науковою новизною, сформульовані автором самостійно. Вони відображають її науковий внесок у розв'язання комплексу задач що пов'язані з процесами гідродинамічної кавітації при обробці і дегазації рідин та водоочищенні. Аналіз змісту дисертаційної роботи Целеня Б.Я. дає підстави стверджувати, що сформульована автором мета дослідження досягнута, завдяки вирішенню поставлених задач. Результати аналітичних, чисельних та експериментальних досліджень характеризуються науковою новизною та мають достатню ступінь апробації.

Серед найбільш вагомих наукових результатів дисертаційного дослідження, які вперше досягнуті, слід відзначити:

1. Із застосуванням математичної моделі динаміки одиначної бульбашки вперше виявлено існування ефекту розбіжності двох пульсуючих в акустичному полі різних за розміром бульбашок, що суперечить відомому закону Б'єркнеса про силову взаємодію пульсуючих бульбашок і вносить певний внесок в розуміння процесів акустичної кавітації, зокрема механізму акустичної дегазації рідини. Вперше визначено критерій переходу пульсуючих в ультразвуковому полі двох різних за розміром бульбашок від режиму їх сходження до режиму їх розбіжності.

2. На підставі експериментальних досліджень та теоретичного аналізу на базі 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.

3. За допомогою моделі динаміки одиначної бульбашки проведено моделювання динаміки парогазових бульбашок у стисливій рідині з урахуванням ефектів сферичного гідравлічного удару. На основі модифікації рівняння Релея–Плесета вперше виведено просте рівняння, яке описує динаміку одиначної бульбашки в стисливій рідині. В модифіковане рівняння Релея–Плесета введено лише один параметр – коефіцієнт адіабатичної стисливості рідини β_{ad} , що залежить від температури. Це дає можливість більш точно оцінити величину стисливості рідини на межі з терміком, який перебуває в стані надкритичного флюїду.

4. Вперше встановлено критерій незворотної деформації та подальшого руйнування рідинних та газових дисперсій в зсувних течіях $(a/R)_{cr} = 2,2$, який не залежить від: теплофізичних властивостей суцільної та дисперсної фаз, числа Рейнольдса, 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.

5. 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.

6. Вперше досліджено вплив концентрації мікробульбашок в рідині і їх початкового радіуса на кінетику пароутворення та визначено умови для інверсії фаз в потоці парогазорідинної суміші.

7. Знайшло 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 з сопла Вентурі.

8. На основі модифікації моделей динаміки одиначної бульбашки та динаміки бульбашкового ансамблю створено модель кавітаційної дегазації рідини, використовуючи яку, проведено обчислювальні експерименти по 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 отриманих результатів

1. Запропоновано і реалізовано використання кавітаційних механізмів принципу ДІВЕ щодо розроблення енергоефективного обладнання для обробки і очищення рідин, що базується на результатах аналітичних та експериментальних досліджень гідродинамічних і тепломасообмінних процесів у складних гетерогенних системах.

2. Створено дослідно-промислові стенди для дослідження перебігу процесу обробки і дегазації рідин з гідродинамічними кавітаційними реакторами на базі сопла Вентурі і роторно-пульсаційного апарата. Створено дослідно-промисловий стенд для дослідження впливу гідродинамічної обробки з використанням модифікованого пульсаційного диспергатора як альтернативи роторно-пульсаційному апарату для готування водовугільного палива.

3. Створено удосконалену методику розрахунку гідродинамічних кавітаційних реакторів на базі сопла Вентурі та роторно-пульсаційного апарата для визначення зміни тиску рідини при проходженні через кавітаційний реактор.

4. Запропоновано практичні шляхи підвищення ефективності промислових кавітаційних технологій очищення води від шкідливих (агресивних) газів,

водопідготовки з метою пом'якшення води і диспергування водовугільної суспензії для приготування універсального водовугільного палива.

5. В рамках виконання науково-технічної роботи за державним замовленням згідно договору №ДЗ/52-2015 з МОН України (№ ДР 0115U005525) розроблено дослідний зразок установки для нейтралізації кислого конденсату продуктів згоряння природного газу і проведено його випробування в умовах наближених до виробничих (акт проведення приймальних випробувань від 16.12.2016 р.).

6. В рамках проведення досліджень по обробці води після скрубера лабораторної установки гранульованих мінеральних добрив на дослідному зразку установки нейтралізатора безреагентного отримано рекомендацію щодо можливості оснащення нейтралізатором безреагентним технологічної схеми виробництва гранульованих мінеральних добрив для зниження екологічного навантаження на оточуюче середовище і впроваджено в навчальний процес отримані теоретичні результати (акт впровадження від 23.11.2017 р., кафедра МАХНВ інженерно-хімічного факультету КПІ ім. Ігоря Сікорського).

7. Створені субмоделі кавітаційні реакторів на базі сопла Вентурі та роторно-пульсаційного апарата, які можна використовувати як окремі субмоделі в загальній моделі процесу кавітаційної дегазації рідини. Математичну модель опису кінетики кавітаційних процесів у соплі Вентурі впроваджено в навчальні дисципліни (акт впровадження від 08.11.2021 р., кафедра МАХНВ інженерно-хімічного факультету КПІ ім. Ігоря Сікорського).

8. Впроваджено в навчальні дисципліни «Процеси та обладнання хімічної технології», «Інжиніринг інноваційних технологій та обладнання» і «Перспективні напрями розвитку енерго- та ресурсоефективних процесів, обладнання та технологій» удосконалену методика розрахунку гідродинамічних кавітаційних реакторів на базі сопла Вентурі та РПА для застосування в технологіях дегазації та очищення рідин. Дана методика дозволяє проводити на базі удосконаленої моделі процесу дегазації рідини обчислювальні експерименти по визначенню закономірності розвитку кавітаційного бульбашкового кластера залежно від концентрації та початкового розміру парогазових зародків і обґрунтовувати оптимальні режими роботи обладнання (акт впровадження від 03.12.2024 р., кафедра МАХНВ інженерно-хімічного факультету КПІ ім. Ігоря Сікорського).

Повнота викладення наукових положень, матеріалів, висновків і рекомендацій дисертації в опублікованих працях

Основний зміст дисертації викладено в 50 публікаціях. Здобувач є співавтором 4 монографій; 22 статей опубліковано в наукових фахових виданнях України; 7 статей опубліковано в виданнях, що індексуються наукометричними базами даних Scopus та Web of Science; 5 патентів України на винахід; 1 патент України на корисну модель. Результати досліджень по дисертаційній роботі

доповідалися на 5 міжнародних наукових конференціях, про що свідчать опубліковані тези доповідей.

Коротка характеристика змісту роботи

Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою. Текст дисертації складається зі вступу, семи розділів, висновків, списку використаних літературних джерел з 470 найменувань та додатків. Загальний обсяг дисертаційної роботи складає 338 сторінок машинописного тексту. Робота містить 102 рисунків та 38 таблиць.

Відповідно до змісту роботи у *вступі* викладена та обґрунтована актуальність теми дисертаційної роботи. Показаний зв'язок наукових досліджень з науковими програмами, планами і темами, співвиконавцем яких є здобувач. Сформульовані мета і основні завдання досліджень, описані об'єкт, предмет і методи досліджень, наведено положення про наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, а також наведено дані про апробацію результатів дисертаційної роботи на конференціях, та представлено відомості про особистий внесок здобувача та його публікації за темою дисертації.

У *першому розділі* дисертації наведений огляд літературних джерел за темою дисертаційної роботи.

На основі аналізу наукових досліджень використання кавітаційних процесів та явищ встановлено, що гідродинамічна кавітація може розглядатись як дешевша альтернатива акустичній кавітації для промислового застосування, зокрема, для очищення стічних вод, в системах водопідготовки, аерації та дегазації рідин, в енергетиці, харчовій, хімічній, нафтопереробній та інших галузях промисловості. Однак відсутність узагальнюючих математичних моделей з максимальним урахуванням визначальних фізичних факторів і труднощі проведення експериментальних досліджень в часовому та просторовому наномасштабах стримують застосування гідродинамічної кавітації в промислових технологічних процесах через труднощі вибору та обґрунтування раціональної конструкції кавітаційного обладнання і оптимальних режимів його роботи. Таким чином, дослідження в цьому напрямку є актуальними.

Для достовірного опису перебігу процесів гідродинамічної кавітації потрібне створення удосконаленої математичної моделі. Зокрема, в існуючих моделях кавітації базове рівняння Релея–Плесета не враховує стисливість рідини, яка істотно впливає на інтенсивність ударних хвиль, що випромінюються в навколишнє рідинне середовище під час фази відскоку після колапсу бульбашки.

Труднощі виникають також при теоретичному описі нестационарних гідродинамічних процесів у кавітаційних реакторах на базі таких пристроїв як РПА, що пов'язано зі складністю їх конструкції і необхідністю враховувати вплив різноманітних чинників на оброблюване середовище.

Розглянуті перспективи та особливості застосування технологій гідродинамічної кавітації при обробці і дегазації рідин та водоочищенні, що дало змогу сформулювати мету дисертаційного дослідження, а також задачі, які необхідно вирішити.

У *другому* розділі дисертаційної роботи представлено розроблену математичну модель, яка описує динаміку парогазових бульбашок у стисливій рідині з урахуванням ефектів сферичного гідравлічного удару.

При дослідженні кінетики кавітаційного закипання рідини в ізотермічному режимі внаслідок швидкого скидання тиску автором розглянуто умови активації газових мікрозародків. Виведено формули для розрахунку критичних значень тиску в рідині і радіуса бульбашки, які відповідають початку її незворотного зростання, а також дозволяють описати подальшу еволюцію бульбашки після її активації.

Автором розроблено математичну модель для розрахунку сопла Вентурі як кавітаційного реактора з точним врахуванням гідравлічних опорів його складових. Дослідження розподілу тиску і швидкості в потоці рідини по довжині сопла показало, що при високих швидкостях потоку на вході в сопло і при достатньому звуженні каналу тиски в рідині приймають високі негативні значення, що забезпечує активацію великої кількості газових зародків і більш інтенсивні ефекти кавітації.

Створено математичну модель деформування та руйнування рідких та газових дисперсій в зсувних течіях, яка дозволяє описати процеси деформації і руйнування дисперсій в зазорах РПА в широкому інтервалі зміни режимних параметрів. Вперше встановлено критерій незворотної деформації та наступного руйнування рідинних та газових дисперсій в зсувних течіях.

В дисертаційній роботі розроблено математичну модель гідродинамічних процесів в РПА циліндричного типу системи ротор–статор–ротор, що описує нестационарний рух рідини в РПА при періодичному перекритті каналів між роторами і статором з точним урахуванням питомих величин гідравлічних опорів залежно від числа Рейнольдса.

У *третьому розділі* автором в процесі досліджень визначено режимні параметри роботи обладнання для приготування універсального водовугільного палива. 3. Проведено дослідження впливу гідродинамічної обробки з використанням модифікованого пульсаційного диспергатора як альтернативи РПА для готування водовугільного палива. Цей тип гідродинамічного кавітаційного реактора більш стійкий до абразивному впливу з боку жорстких водовугільних суспензій ніж РПА і, відповідно, відрізняється більш тривалим терміном експлуатації. Визначено вплив тривалості обробки на дисперсний склад суспензії. Встановлено, що обробка в кавітаційному диспергаторі протягом 20 хв. дозволяє отримувати фракційний склад палива, що відповідає вимогам

використання як для ТЕС так і для котельних, а обробка протягом 30 хв. – для ТЕЦ.

Визначено, що вплив кавітації на дисперсійне середовище створює можливість суттєвого або повного скорочення додавання поверхнево-активних домішок до суспензії забезпечуючи седиментаційну стійкість ВВС протягом 5-6 діб. Підтримання седиментаційної стійкості суспензії протягом більш тривалого часу можливе також з застосуванням хімічних домішок або періодичною короткотривалою рециркуляцією водовугільної суспензії з інтервалом 2-3 доби.

В дисертаційній роботі встановлено, що при обробці води з метою зниження її жорсткості збільшення швидкості зсуву потоку рідини при її проходженні через РПА та збільшення кількості циклів обробки призводить до підвищення рН води від 7,2 до 8,6 при швидкості зсуву $40 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$ після 10–12 циклів обробки. Подібна закономірність також спостерігалась при визначенні концентрації іонів кальцію, що знизилась з 77,1 до 57,1 мг/дм³ протягом 15 циклів обробки при тій же швидкості зсуву потоку.

Дисертантом в процесі досліджень визначено, що при збільшенні концентрації розчину аміаку та кількості циклів обробки в РПА при постійній швидкості зсуву $40 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$ спостерігається зростання рН води. Крім того, встановлено, що зі збільшенням концентрації гідроксиду амонію в розчині від 0 до 0,15 мг/дм³ без обробки концентрація іонів кальцію знижується на 64 %, проте при швидкостях зсуву потоку $(20 \div 40) \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$ концентрація іонів кальцію знижується на 98,5 ÷ 99,3 % відповідно.

У *четвертому* розділі досліджені фактори і геометричні розміри елементів обладнання для ефективного застосування сопла Вентурі як кавітаційного реактора. Визначено, що входними змінними параметрами моделі є лише дві величини – тиск на виході з відцентрового насоса і діаметр горловини сопла. Для ефективної роботи сопла Вентурі необхідно забезпечити гранично високу швидкість зниження тиску рідини в горловині до мінімальних від'ємних значень і, таким чином, ініціювати зростання найменших газових зародків.

В дисертаційній роботі проведені обчислювальні експерименти по вивченню руйнування газових дисперсій під дією зсувних напружень в міжциліндрових зазорах РПА, які підтвердили, що і для інерційного, і для стоксівського режимів, як для малов'язких рідини, так для високов'язких, встановлений нами критерій руйнування крапель бульбашок в зсувних течіях $(a/R)_{cr} = 2,2$ залишається справедливим.

Автором розроблено алгоритм розрахунку об'ємної концентрації газових зародків у воді та початкового вмісту газової фази у воді, який входить в якості субмоделі застосованих гідродинамічних кавітаційних реакторів (сопла Вентурі та РПА) і може застосуватися для будь якої рідини. Для цього необхідно для даної рідини мати попередньо визначені достовірні експериментальні дані стосовно густини об'ємної концентрації зародків заданого фракційного складу.

Використовуючи створені субмоделі кавітаційного реактора на базі сопла Вентурі та кавітаційного реактора на базі РПА проведено обчислювальні експерименти по вивченню початкової стадії кавітації – формування та еволюції кавітаційного кластера, що визначає інтенсивність процесу дегазації.

У *п'ятому* розділі представлено результати дослідження зміни вмісту газової фази модельної рідини (розчину діоксиду вуглецю в дистильованій воді) від тривалості її обробки при двох режимах ведення процесу з використанням сопла Вентурі як кавітаційного реактора, які показали, що вищий тиск на вході в сопло підвищує ефективність дегазації, яка становить 87,3 % для першого ($p_0 = 0,15$ МПа) і 99,2 % для другого режиму обробки ($p_0 = 0,30$ МПа).

Дисертантом встановлено, що швидкість активації вища для бульбашок більшого розміру. Граничною умовою для видалення розчинених газів буде найбільший від'ємний тиск, якого можна досягти для активації бульбашок мінімального розміру. Визначено динаміку зміни вмісту розчиненої вугільної кислоти залежно від тривалості гідродинамічної обробки рідини. Встановлено, що протягом двох хвилин обробки вилучається основна кількість вугільної кислоти, – як з модельної рідини, так і з конденсату продуктів згоряння природного газу.

Проведене автором експериментальне дослідження динаміки зміни вмісту розчиненої вугільної кислоти разом з теоретичними дослідженнями процесу зростання газопарових бульбашок в рідині та еволюції сукупності парогазових бульбашок до моменту досягнення критичної величини вмісту газової фази можуть знайти застосування для оптимізації процесів кавітаційної дегазації рідин і обґрунтуванні оптимальних параметрів цих процесів.

У *шостому* розділі проаналізовано механізм утворення конденсату продуктів згоряння природного газу. Встановлено, що концентрація діоксиду вуглецю в ньому значно перевищує рівноважну і залишається стабільною протягом тривалого періоду. Визначено, що стабільно вища за рівноважну концентрація вугільної кислоти зумовлена присутністю в рідині мікро- і нанобульбашок, що зумовлюють новий рівноважний стан в системі «рідина-газ».

Дисертантом проведено розрахунки концентрації бульбашок діоксиду вуглецю і газовмісту в монодисперсній бульбашковій суміші «конденсат – діоксид вуглецю» для різних значень радіуса бульбашок залежно від зовнішнього тиску і масової концентрації діоксиду вуглецю. Визначені оптимальні режими нейтралізації кислого конденсату.

Встановлено, що величина водневого показника обробленої рідини продовжує зростати після обробки, тому для отримання величини водневого показника не нижче 6,0 достатньо забезпечити тривалість рециркуляції рідини протягом 1,5...2,5 хвилин після чого витримати оброблену рідину до отримання необхідного значення рН.

У *сьомому* розділі на основі способу кавітаційної дегазації рідини розроблене інноваційне обладнання для безреагентної нейтралізації кислого конденсату продуктів згоряння природного газу.

Дисертантом встановлено, що отримане середнє значення продуктивності установки 290 л/год (при тривалості рециркуляції рідини 2 хв) відповідає максимально можливій кількості кислого конденсату, що утвориться при роботі конденсаційного газового котла тепловою потужністю 2,1 МВт.

На основі проведених попередніх випробувань дослідного зразка установки нейтралізатора безреагентного надано рекомендації щодо вибору режимних параметрів роботи установки з метою підвищення продуктивності її роботи, що дозволить підвищити середнє значення продуктивності установки даної конструкції. Визначено оптимальну продуктивність розробленого дослідного зразка установки нейтралізатора безреагентного. Встановлено що кавітаційна обробка води в РПА може знайти застосування при реалізації низки хімічних методів пом'якшення води для зменшення витрати реагентів та підвищення ступеня її очищення. Визначено, що отримана водовугільна суспензія може бути використана як універсальне водовугільне паливо, яке можна застосовувати для спалювання в котлах, печах, різноманітному теплоенергетичному обладнанні, двигунах внутрішнього згоряння тощо.

Висновки достатньо повно відображають хід розв'язання поставлених у роботі завдань, містять основні результати дисертаційного дослідження та їх аналіз.

Список використаних джерел повний і охоплює сучасні вітчизняні та зарубіжні публікації.

Відповідність роботи вимогам МОН України.

Дисертаційна робота є завершеним науковим дослідженням, виконана на достатньо високому науково-теоретичному рівні, оформлена у повній відповідності нормам і правилам Міністерства освіти і науки України щодо написання та оформлення дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора наук.

Автореферат за структурою і технічним оформленням відповідає визначеним Міністерством освіти і науки України стандартам, його зміст повністю відповідає змісту дисертаційної роботи.

Дискусійні питання та зауваження до дисертаційної роботи, які потрібно пояснити

Представлений текст дисертаційної роботи дає змогу зробити висновок про високий науково-дослідницький рівень отриманих результатів, їх оригінальність та вагомість авторських узагальнень.

Аналізуючи зміст поданої до захисту дисертаційної роботи та зроблені висновки, вважаю за потрібне визначити низку дискусійних положень, а саме:

1. Яким чином значення критичного тиску p_c враховує зміну парціального тиску в бульбашці?
2. При обтіканні краплі потоком на її поверхню з боку оточуючої рідини діє гідродинамічна сила F_ξ , протидіють їй капілярна сила F_σ , яка прагне повернути краплю до сферичної форми, а також сила в'язкості F_μ . На скільки зміниться результат якщо додатково врахувати гравітаційні і Архімедові сили?
3. Автор стверджує, що значення $(a/R)_{cr}$ є чисто геометричним фактором, котрий не залежить ні від теплофізичних характеристик обох фаз, ні від режимних параметрів потоку, і може розглядатися як фізична константа, котра визначається як $(a/R)_{cr} = 2,2$. З рисунку 2.16 можливо побачити певне відхилення значення на кривій 3, що потребує пояснення і більш гнучкого тлумачення.
4. З чим пов'язано вибір розмір частинки “універсального палива” в 3 мкм? Традиційно, в енергетиці при факельному спалюванні твердого палива для визначення часу вигорання частинки палива користуються такою характеристикою, як залишок на ситі R_{90} , що на два порядки більша.
5. Автор стверджує, що висока ефективність приготування водовугільного палива в РПА пояснюється деструкцією молекул вугілля, що розпадається на окремі органічні складові з активною поверхнею частинок та високою кількістю вільних органічних радикалів. Крім того, в результаті обробки в РПА вода також зазнає змін – у ній утворюються атомарний водень, перекис водню H_2O_2 . Подібні висновки потребують експериментального підтвердження.
6. Принцип роботи лабораторних стендів на основі сопла Вентурі і РПА як кавітаційних реакторів полягала в тому, що рідина проходила кавітаційний реактор і після дегазації пара рідини разом з домішками газу відводилась з камери за допомогою вакуумного насоса. Рідина зі зменшеним вмістом газу збирається в нижній частині камери і далі під дією відцентрового насоса знову рециркулює через реактор. Використання такої методики проведення досліджень дає тільки інтегральні показники за певний час роботи обладнання. Бажано було би, навести локальні показники зміни параметрів за один повний цикл проведення дослідження без рециркуляції рідини, що значно підвищило цінність результатів.
7. При визначенні складу продуктів згорання для котлів, які працюють з рівноваженою тягою або під розрідженням, необхідно враховувати присмоки повітря в конвективні газоходи котла. Не врахування цього фактору може привести до погіршення точності результатів. Потребує також підтвердження, що вуглецевий газ знаходиться як у розчиненому стані, так і вигляді мікро- і нанорозмірних бульбашок.

8. При представленні результатів фізичного і чисельного експерименту по дослідженню гідродинамічної кавітації при обробці і дегазації рідин та водоочищенні необхідно навести аналіз похибки досліджень і обробки експериментальних даних.
9. У дисертаційній роботі використовуються одночасно позначення розмірностей фізичних величин в системі СІ так і в МКГСС.


Вказані зауваження не знижують загального позитивного враження від дисертаційного дослідження Целеня Б.Я., яке має велике значення для розвитку методів гідродинамічної кавітації при обробці і дегазації рідин та водоочищенні.

ВИСНОВОК


Отримані результати та висновки мають наукову новизну, важливе теоретичне та практичне значення, роблять безперечний внесок у розвиток теоретичних досліджень процесів тепломасообміну і гідродинамічної кавітації при обробці і дегазації рідин та водоочищенні. Дослідження виконано на високому науковому рівні, матеріал викладено чітко й обґрунтовано. Використано багато графічних узагальнень результатів моделювання, що значно полегшує сприйняття матеріалу. Усі висновки є чітко аргументованими.

Дисертаційна робота Целеня Богдана Ярославовича «Розвиток наукових основ застосування методу гідродинамічної кавітації при обробці і дегазації рідин та водоочищенні» є науковою працею, яка відповідає пунктам 7, 9, «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 17 листопада 2021 р. №1197 (зі змінами, затвердженими постановою Кабінету Міністрів України від № 502 від 19.05.2023), а її автор, Целень Богдан Ярославович, заслуговує на присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.14.06 – технічна теплофізика та промислова теплоенергетика.


Офіційний опонент:
доктор технічних наук,
професор Національного технічного
університету України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»,
завідувач кафедри атомної енергетики


Валерій ТУЗ

Підпис В.Туза засвідчую


Внешній секретар
КПІ ім. Ігоря Сікорського




Валерій Холєвко