

ВІДЗИВ

офіційного опонента на дисертаційну роботу **Целеня Богдана Ярославовича** “**Розвиток наукових основ застосування методу гідродинамічної кавітації при обробці і дегазації рідин та водоочищенні**”, подану до захисту на здобуття наукового ступеня доктора технічних за спеціальністю 05.14.06 – технічна теплофізика та промислова теплоенергетика

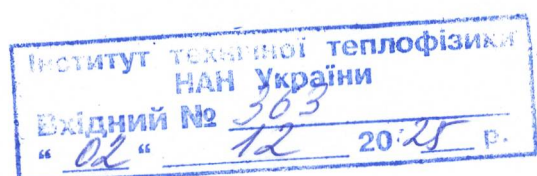
1.Актуальність теми дисертаційної роботи.

Дисертаційна робота присвячена розвитку науково-практичних засад фізичних механізмів енергетичного впливу принципу ДІВЕ на водні системи та розробленню практичних шляхів підвищення ефективності промислових технологічних процесів обробки, очищення і дегазації рідин на основі гідродинамічної кавітації.

Кавітація, внаслідок енергетичного впливу на мікроструктури рідких середовищ, є потужним інтенсифікатором тепломасообмінних та гідродинамічних процесів, що протікають на мікромасштабному рівні в енергетичних, теплотехнологічних і біологічних об'єктах. Гідродинамічна кавітація, не потребуючи значних енергетичних витрат на її здійснення, має високу енергетичну ефективність, тому знаходить широке застосування в технологіях очищення забруднених вод, дегазації рідин та розчинів в різних галузях промисловості – харчовій, нафтопереробній, хімічній та ін. Кавітаційний процес є потужним механізмом досягнення високих енергетичних показників в технологіях, пов'язаних з обробкою рідких дисперсних середовищ під час проведення операцій диспергування –гомогенізації, емульгування, екстрагування, тощо. В той же час, швидкоплинність та фізична складність кавітаційних процесів ускладнює як створення адекватних математичних моделей, так і отримання достовірних експериментальних результатів, які б розкривали та поглиблювали знання в області кавітації, на основі яких розкривалися б нові можливості застосування кавітаційних технологій. Виходячи з вище сказаного, подальші дослідження в цьому напрямку є актуальними.

2. Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота виконувалася у відповідності з науковою тематикою Інституту технічної теплофізики НАН України та пов'язана з державними



тематиками у яких автор брав участь як виконавець та відповідальний виконавець:

– «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. Том 4: Розроблення технології та обладнання для очищення води після конденсаційних теплоутилізаційних установок» (№ держ. реєстр. 0123U100945);

– «Синергетичний ефект імпульсного впливу в гідродинамічних і тепломасообмінних процесах технологій диспергування та гомогенізації» (№ держ. реєстр. 0120U103391);

– «Підвищення ефективності технології зниження викидів оксидів азоту шляхом рециркуляції димових газів в котельних установках комунальної і промислової енергетики. Том 4: Аналіз особливостей і методів нейтралізації конденсату з димових газів на основі дискретно-імпульсного введення енергії» (№ держ. реєстр. 0122U002062);

– «Дослідження процесів трансформації енергії в рідких гетерогенних системах при використанні метода дискретно-імпульсного введення енергії» (№ держ. реєстр. 0117U000949);

– «Теоретичні і експериментальні дослідження тепломасообміну в технологічних процесах з використанням методу дискретно- імпульсного введення енергії (ДІВЕ)» (№ держ. реєстр. 0115U000386);

– «Розроблення і впровадження дослідного зразка установки нейтралізації конденсату продуктів згорання природного газу» (№ держ. реєстр. 0113U006201);

– «Розроблення двокамерної установки для безреагентної нейтралізації кислих конденсатів продуктів згорання газу в опалювальних та промислових котельнях» (№ держ. реєстр. 0115U005525);

– «Розробка методів інтенсифікації процесів гідратації, гідролізу і екстракції на основі використання механізмів дискретно-імпульсного введення енергії» (№ держ. реєстр. 0112U004699);

– «Дослідження впливу кавітаційних ефектів в апаратах ДІВЕ на фізико-хімічні властивості водних систем» (№ держ. реєстр. 0115U005178);

– «Оптимізація енергоефективності в апаратах вакуумного та екструзійного типів» (№ держ. реєстр. 0109U005924);

– «Дослідження тепломасообміну при дискретно-імпульсному вводиті енергії в гетерогенні системи з метою розробки нанотехнологій і їх реалізації» (№ держ. реєстр. 0107U002880).

3. Наукова новизна роботи та важливість одержаних результатів

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження полягає в наступному:

- застосовуючи математичну модель динаміки одиничної 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;

- дістало подальший розвиток наукове обґрунтування методу інтенсифікації механізмів кавітаційної обробки дисперсних рідинних сумішей в процесах водоочищення та створення водовугільних суспензій, який базується на застосуванні сукупності бульбашок, що динамічно розвиваються в потоці рідини при її проходженні через гідродинамічний кавітаційний реактор на підставі експериментальних досліджень та теоретичного аналізу на базі моделі динаміки бульбашкового ансамблю;

- вперше проведено за допомогою моделі динаміки одиничної бульбашки 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 одиничної бульбашки в стисливій рідині і містить лише один параметр – коефіцієнт адіабатичної стисливості рідини β_{ad} , що залежить від температури та дає можливість більш точно оцінити величину стисливості рідини на границі с терміком, який перебуває в стані надкритичного флюїду;

- вперше встановлено критерій незворотної деформації та подальшого руйнування рідинних та газових дисперсій в зсувних течіях $(\alpha/R)_{cr} = 2,2$, 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 з сопла Вентурі;

- створено на основі модифікації моделей динаміки одиначної бульбашки та динаміки бульбашкового ансамблю модель кавітаційної дегазації рідини і 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.

4. Достовірність та обґрунтованість

Достовірність отриманих наукових положень підтверджується застосуванням сучасних методів проведення експериментальних досліджень, засобів вимірювань, методів математичного моделювання та підтверджується відповідністю розрахунків за розробленими моделями результатам експериментальних досліджень та промислових випробувань кавітаторів.

5. Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що

- запропоновано і реалізовано використання принципу дискретно-імпульсного введення енергії для розроблення енергоефективного обладнання для обробки і очищення води від агресивних газів, пом'якшення води і диспергування водовугільної суспензії для приготування універсального водовугільного палива; створено дослідно-промисловий стенд для дослідження впливу гідродинамічної обробки водовугільних суспензій з використанням модифікованого пульсаційного диспергатора для готування водовугільного палива; розроблено дослідний зразок

установки для нейтралізації кислого конденсату продуктів згорання природного газу;

- розроблені субмоделі кавітаційних реакторів на базі сопла Вентурі та РПА, які можна використовувати як окремі субмоделі в загальній моделі процесу кавітаційної дегазації рідини.

Практичне значення результатів роботи підтверджується одержаними патентами України:

- Спосіб обробки води (Патент 114374 України на винахід);
- Пристрій для дегазації, нейтралізації та коригування фізико-хімічних властивостей водних систем (Патент 115628 України на винахід);
- Пристрій для обробки рідини (Патент 118407 України на винахід);
- Пристрій для дегазації, нейтралізації та коригування фізико-хімічних властивостей водних систем (Патент 124362 України на винахід);
- Роторно-імпульсний апарат (Патент 99823 України на корисну модель).

6. Структура та обсяг роботи

Дисертація має структуру завершеної науково-дослідної роботи. Текст дисертації складається зі вступу, семи розділів, висновків, списку використаних літературних джерел з 470 найменувань, 5 додатків. Загальний об'єм дисертаційної роботи складає 338 сторінок машинописного тексту. Робота містить 102 рисунків та 38 таблиць.

Автореферат повністю відповідає матеріалам, викладеним в дисертації.

В анотації стисло наведені основні результати теоретичних та фізичних досліджень механізмів енергетичного впливу принципу ДІВЕ на водні системи, а також практичні шляхи підвищення ефективності промислових технологічних процесів обробки, очищення і дегазації рідин на основі гідродинамічної кавітації.

У вступі обґрунтована актуальність роботи, мета та задачі, наведені наукова новизна та практична цінність отриманих результатів, особистий внесок здобувача, відомості про апробацію результатів дисертації.

У першому розділі.

Виконано аналіз досліджень використання кавітаційних процесів для застосування в процесах виготовлення водо-мазутних емульсій, системах

очищення стічних вод, водопідготовки, аерації та дегазації рідин, в харчовій, хімічній, нафтопереробній та інших галузях промисловості та енергетиці. Обґрунтовуються переваги гідродинамічної кавітації над акустичною як менш енергозатратної. Виконано аналіз ефективності існуючих способів реалізації кавітаційних процесів – акустичної, гідродинамічної, парової, електророзрядної, лазерної. Розглянуті конструктивні особливості кавітаторів – сопла Вентурі, роторно-пульсаційного апарата, пластини з отворами, кавітаційного диспергатора, відцентрового насоса. Розглянуті механізми гідродинамічної кавітації – симетричний та асиметричний колапс. Розглянуті моделі кавітації, що базуються на співвідношення Релея-Плесета. Наголошується, що в існуючих моделях кавітації базове рівняння Релея-Плесета не враховує стисливість рідини, яка істотно впливає на радіальний рух стінки кавітаційної бульбашки до моменту її колапсу.

На основі виконаного аналізу сформульовано мету та завдання даної роботи, а саме:

- проаналізувати сучасний стан досліджень у сфері кавітаційних, тепломасообмінних і гідродинамічних процесів в багатофазних середовищах, розглянути динамічний розвиток бульбашок в рідині як специфічну реалізацію принципу ДІВЕ, що призводить до формування кавітаційних явищ, дослідити умову рівноваги бульбашок в системі «парогазові бульбашки – рідина» в процесі кавітаційного закипання і описати подальшу еволюцію бульбашки;

- розробити математичну модель, що описує динаміку парогазових бульбашок у стисливій рідині з урахуванням ефектів сферичного гідравлічного удару; створити математичні моделі для розрахунку сопла Вентурі та РПА як кавітаційних реакторів для опису розподілу тиску і швидкості в потоці рідини; створити математичну модель для опису процесів деформації і руйнування дисперсій в зсувних течіях в зазорах роторно-пульсаційного апарата і провести обчислювальний експеримент по розрахунку залежності капілярної сили від ступеня деформації краплі для різних дисперсних систем «рідина в рідині», відмінних за своїми теплофізичними характеристиками;

- створити експериментальні установки для дослідження впливу гідродинамічної кавітації на інтенсифікацію технологічних процесів обробки і дегазації рідин та водоочищення; провести експериментальні дослідження і оцінити можливості інтенсифікації процесів дегазації, очищення і диспергування багатофазних середовищ за допомогою гідродинамічної кавітації;

– сформулювати рекомендації щодо практичного застосування отриманих результатів в технологічних процесах очищення і дегазації рідин, водопідготовки, отримання водовугільних суспензій.

Другий розділ присвячено створенню та застосуванню моделей кавітації, як потужного механізму дискретно-імпульсного введення енергії, який по енергетичним показникам характеризується високою ефективністю. В дисертації наведена математична модель, що описує динаміку парогазових бульбашок у стисливій рідині з урахуванням ефектів сферичного гідравлічного удару, в розвиток розроблених в ІТТФ НАН України уніфікованої математичної моделі динаміки одиначної бульбашки (модель ДОБ) і математичної моделі динаміки ансамблю парових бульбашок (модель ДБА). В результаті врахування стисливості рідини автору вдалося внести поправку на стисливість в рівняння Релея-Плесета, що дозволило адекватно відобразити динаміку поодинокі сферичної бульбашки під час руху через сопло Вентурі. Створено математичну модель для розрахунку сопла Вентурі як кавітаційного реактора.

Автором надано математичну модель деформування та руйнування рідких та газових дисперсій в зсувних течіях, яка дозволяє описати процеси деформації і руйнування дисперсій в зсувних течіях в широкому інтервалі зміни режимних параметрів, а також встановити критерій незворотної деформації та наступного руйнування рідинних та газових дисперсій в зсувних течіях.

Автором надано математичну модель гідродинамічних процесів в РПА циліндричного типу системи ротор–статор–ротор, яка описує нестационарний рух рідини в РПА при періодичному перекритті каналів між роторами і статором.

Дана модель дає змогу описати поле лінійних швидкостей потоку і тисків по довжині каналів РПА і дає змогу прогнозувати динаміку парогазових бульбашок в процесі гідродинамічної обробки рідин.

У третьому розділі розглянуто застосування кавітаційних механізмів впливу на гідродинамічну структуру водо-вугільних суспензій, безреагентного зменшення жорсткості води та інтенсифікації гідродинамічного впливу на водневий показник рідини при додаванні малих доз реагентів.

Автором виконані лабораторні дослідження впливу гідродинамічної обробки для готування водовугільного палива з використанням модифікованого пульсаційного диспергатора як альтернативи РПА. Визначено вплив тривалості обробки на дисперсний склад суспензії, отримані конкретні результати щодо часу кавітаційної обробки в РПА для отримання фракційного складу водовугільного

палива, що відповідає вимогам використання як для ТЕС так і для котельних. Визначено режим підтримання седиментаційної стійкості суспензії протягом більш тривалого часу, або із застосуванням хімічних домішок або періодичною короткотривалою рециркуляцією ВВС з інтервалом 2-3 доби.

Надані результати досліджень кавітаційної обробки води в РПА з метою зниження її жорсткості. Показано, що збільшення швидкості зсуву потоку рідини при її проходженні через РПА та збільшення кількості циклів обробки призводить до підвищення рН води до 1,5 одиниць; також відмічено зниження концентрації іонів кальцію на 25% в процесі багатократної рециркуляції води через РПА.

Визначено вплив додавання малої дози розчину аміаку при постійній швидкості зсуву при обробці води на суттєве зростання рН.

Встановлено вплив додавання малої кількості гідроксиду амонію в розчині при обробленні в РПА на концентрацію іонів кальцію, яка знижується на 98-99% , в той час як без кавітаційної обробки концентрація іонів кальцію знижується лише на 64 %.

Четвертий розділ присвячено розрахункам обладнання для здійснення енергетичного впливу ДІВЕ на водні системи.

В роботі обґрунтовується, що для ефективної роботи сопла Вентурі необхідно забезпечити гранично високу швидкість зниження тиску рідини до мінімальних значень, що дає змогу ініціювати зростання найменших газових зародків.

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

В роботі розроблено алгоритм розрахунку об'ємної концентрації газових зародків у воді та початкового газовмісту води на основі створеної субмоделі кавітаційних реакторів на базі сопла Вентурі та РПА при наявності інформації щодо густини об'ємної концентрації зародків заданого фракційного складу.

Особливу увагу приділено дослідженню оптимальних параметрів кутів розкриття конфузора та дифузора, а також оптимальній довжині горловини сопла для ефективного застосування сопла Вентурі як кавітаційного реактора.

П'ятий розділ присвячено експериментальним дослідженням процесів дегазації рідин із застосуванням гідродинамічних кавітаторів на базі сопла Вентурі та РПА.

Здійснено оцінку ефективності процесу гідродинамічної кавітаційної дегазації, в результаті якої встановлено, що ефективність процесу дегазації залежить від можливості активації найдрібніших бульбашок газу. Визначені зміни в часі величини газовмісту та водневого показника при багатократній примусовій циркуляції води через сопло Вентурі та РПА. Детально описані результати експериментів, які показують високу ефективність дегазації методом гідродинамічної кавітації. Визначено динаміку зміни вмісту розчиненої вугільної кислоти залежно від тривалості гідродинамічної обробки рідини, яка особливо інтенсивна на протязі перших двох хвилин.

Обґрунтовується, що запропонований спосіб дегазації може знайти застосування для безреагентної нейтралізації конденсату продуктів згоряння природного газу, що дозволить поліпшити стан довкілля шляхом зменшення кількості стоків (хімічно забрудненого нейтралізованого конденсату і відходів установок пом'якшення води) і раціонально використовувати водні ресурси за рахунок зниження потреби у природній воді. Також запропонований спосіб дегазації рідини може знайти застосування в харчовій промисловості, зокрема, у виробництві соків, напоїв, рослинних олій тощо.

У шостому розділі наведені результати досліджень процесу нейтралізації кислих конденсатів продуктів згоряння природного газу в котлах.

В результаті досліджень встановлено, що концентрація діоксиду вуглецю в конденсатів, утворених в результаті згоряння газу значно перевищує рівноважну і залишається стабільною протягом тривалого періоду, що зумовлено наявністю в конденсаті мікро- і нанобульбашок. Детально описані результати експериментів щодо зміни водневого показника і температури модельної рідини, що імітувала закислений конденсат, та реального закисленого конденсату від тривалості обробки. Встановлено стійкий ефект зростання водневого показника при обробці конденсату в замкнутому контурі з кавітатором на півтори одиниці, а при повторній обробці після декількогодинної паузи до двох одиниць. Встановлено, що величина водневого показника обробленої рідини продовжує зростати і після обробки, а на основі отриманого факту надані рекомендації щодо оптимального режиму нейтралізації закисленого конденсату з незначним часом обробки та витримкою для отримання потрібного рН.

У сьомому розділі наведені практичні рекомендації щодо реалізації в промисловості кавітаційної технології отримання водо-вугільної суспензії,

безреагентного способу пом'якшення води та нейтралізації кислого конденсату, а також дегазації рідин.

Наведено інформацію про дослідний зразок розробленої установки, яку рекомендується до встановлення на продуктивність 290 л/год, що відповідає максимально можливій кількості кислого конденсату, що утвориться при роботі конденсаційного газового котла тепловою потужністю 2,1 МВт; надані рекомендації щодо вибору режимних параметрів роботи установки з метою підвищення продуктивності її роботи, а також визначено оптимальну продуктивність розробленого дослідного зразка установки, що становить 450 л/годину і може забезпечити нейтралізацію кислого конденсату від котлів сумарною тепловою потужністю як мінімум 3,2 МВт.

Встановлено, 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.

Встановлено що обробка води в РПА використовуючи принцип ДІВЕ може знайти застосування при реалізації низки хімічних методів пом'якшення води для зменшення витрати реагентів та підвищення ступеня її очищення.

У додатках представлені акти впровадження матеріалів дисертаційної роботи:

- протоколи результатів випробувань кавітаційної обробки конденсатів;
- акт проведення приймальних випробувань дослідного зразка установки нейтралізатора безреагентного;
- акти впровадження результатів досліджень при виконанні наукової роботи з трансформації енергії гетерогенних системах при використанні методу ДІВЕ.

7. Повнота викладення наукових положень, висновків, рекомендацій.

Основний зміст дисертації викладений в 50 публікаціях; серед яких – розділи у 4 колективних монографіях, 22 статті у фахових наукових виданнях України, 7 публікацій, що входять до наукометричних баз SCOPUS, Web of Science, 5 патентів України на винахід, 1 патент України на корисну модель, 5 наукових доповідей у збірниках матеріалів міжнародних конференцій.

8. Відповідність дисертації встановленим вимогам.

Дисертаційна робота відповідає вимогам МОН України стосовно наявності результатів проведених досліджень та отриманих науково-обґрунтованих рішень. Автореферат та основні положення дисертації ідентичні за змістом.

9. Оформлення дисертації.

Дисертація акуратно оформлена згідно вимогам МОН України; в роботі наведена достатня кількість ілюстративного матеріалу.

10. Зауваження по роботі.

1. Форма кривої з осциляції паро-газової бульбашки, наведеної на рис. 2,5 (б), як графічної інтерпретації результатів обчислювального експерименту з динаміки поодинокі сферичної бульбашки під час руху через сопло Вентурі за співвідношенням (2.44), що враховує стисливість рідини, суттєво відрізняється від кривої (а), розрахованої за співвідношенням Релея-Плесета (2.45), без врахування стисливості. Стрімке падіння амплітуди пульсацій пов'язують з дисипацією енергії акустичним імпульсом, що виникає під час гідравлічного удару. Оскільки явно з наведених співвідношень даний факт не впливає, було б не зайвим дещо деталізувати процес отримання результатів розрахунків.

2. Залишковий радіус паро-газової бульбашки, як і тиск, після її колапсу в результаті кавітації залежать від вмісту газу в бульбашці, а, відповідно, і від концентрації розчиненого газу в рідині. Оскільки різні гази відрізняються розчинністю в рідинах, було б доцільно виконати аналіз трансформації бульбашки під час кавітації за різної концентрації розчиненого газу в рідині з відповідною графічною інтерпретацією отриманих результатів.

3. В процесі кавітаційного подрібнення часток водо-вугільної суспензії в РПА суміш оброблялась багатократною рециркуляцією в контурі, а проби для вимірювання діаметрів часток відбирались по кожному циклу, що відповідав часу оброблення. За такого способу у вихідну ємність з необробленими частинками повертається суспензія після кавітатора, змішується з вихідною сумішшю і знову поступає на РПА. Тому певний процент частинок проходить повторну кавітацію, що збільшує дисперсію по розмірам частинок, а отримані дані коректні тільки для конкретної установки. Для отримання коректного результату по кожному кавітаційному циклу потрібно мати 2 ємності – суміш з першої ємності пропускається через кавітатор в другу ємність. Далі реверсом з другої в першу і т.д. За такого способу вся суспензія проходить послідовно

кожний цикл, а отриманий результат, щодо залежності розмірів частинок від кількості циклів обробки суспензії, буде більш коректним і не залежатиме від об'єму ємності.

Те саме стосується і процесів зміни загальної жорсткості в результаті обробки в РПА. Проведення процесу кавітаційної обробки води з двома ємностями (без рециркуляції) дозволила б виділити вплив кожного циклу обробки води в РПА на зміну жорсткості при постійних характеристиках води в кожному циклі.

Те саме стосується і кавітаційної обробки кислого конденсату.

4. В дисертації наведена спрощена апроксимація кривих розподілення фракційної густини газових зародків (4.27), експериментально отриманих Бренненом, інтегрування якого дозволило наближено отримати кількість бульбашок в m^3 в заданому діапазоні розмірів бульбашок (4.30). Наголошено, що після розширення в соплі Вентурі бульбашки зростають до однакового розміру, а концентрація їх має визначальний вплив на паровміст β , який, як видно з рис. 4.11, знаходиться в діапазоні $0,1 \dots 0,8$. За даних умов було б доцільно отримати інтегральну характеристику для β експериментальним шляхом методом відсікання потоку між двома засувками в трубопроводі після сопла Вентурі. Порівняння експериментальних значень газовмісту з розрахунковими дало б можливість корекції функції розподілення фракційної густини газових зародків для конкретних умов проведення експерименту.

Крім того, оскільки пара виділяється в потоці рідини, величину β коректно називати не паровмістом, а об'ємним витратним паровмістом, який співпадає з дійсним об'ємним паровмістом φ лише за умови гомогенного двофазного потоку.

5. В дисертації відмічається, що в результаті стрімкого звуження потоку тиск в горловині труби Вентурі може знижуватись до значних від'ємних значень, які перевищують -1 бар. Так, в розділі № 5 на рис.5.3 наведена, отримана розрахунковим шляхом з рівняння Бернуллі, залежність зміни тиску в трубі Вентурі в часі. При тиску рідини після насоса $3,0$ бар та загального абсолютного тиску в контурі $0,11$ бар (розрідження $0,89$ бар) тиск в горловині за 2 мс знижується до $(-9,2)$ бар). Експериментального підтвердження такого феномену не наведено. Оскільки в рівняння Бернуллі для горизонтального потоку крім гідравлічних втрат входять лише тиск та динамічний напір, виникає питання щодо фізичного обґрунтування результату зі значним від'ємним тиском.

6. В дисертаційній роботі автор не використовує в аналізі процесів кавітації поняття число кавітації.

7. В процесі кавітаційного оброблення води підвищеної жорсткості в РПА показано, що збільшення швидкості зсуву потоку рідини при її проходженні через РПА та збільшенні кількості циклів обробки призводить до підвищення рН води до 1,5 одиниць; також відмічено зниження концентрації йонів кальцію на 25% в процесі багатократної рециркуляції води через РПА. Враховуючи, що процес кавітаційного оброблення безреагентний, виникає питання щодо механізму зменшення концентрації йонів кальцію на 25%, оскільки кальцій з води не видалявся.

8. В роботі було б не зайвим виконати моделювання теплогідродинамічних кавітаційних процесів в соплах Вентурі з різною геометрією конфузора та дифузора в прикладному пакеті ANSYS з метою виявлення оптимальних геометричних характеристик сопла.

9. В роботі інколи зустрічаються стилістичні помилки.

Зроблені зауваження не зменшують цінності основних наукових положень, висновків і рекомендацій, що захищаються дисертантом, і не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи.

11. Висновки.

Дисертаційна робота Целеня Богдана Ярославовича є завершеним науковим дослідженням, в якому отримані нові науково обґрунтовані результати, що розширюють сучасні уявлення про застосування кавітаційних механізмів у процесах диспергування, створення альтернативних видів палива, дегазації рідин, тощо.

Практичне значення полягає в реалізації кавітаційних механізмів при розробленні енергоефективного обладнання для оброблення та очищення рідин, створення перспективних видів палива у вигляді водо-вугільних суспензій на основі сопел Вентурі та роторно-пульсаційних апаратів.

Сформульовані в роботі наукові положення, висновки і рекомендації характеризуються високим ступенем обґрунтованості, а їхня вірогідність і новизна не викликають сумнівів.

Зміст автореферату повністю відповідає тексту дисертації, а основні наукові положення, що містяться в них, ідентичні.

За напрямком обраних та вирішених питань дисертаційна робота відповідає спеціальності 05.14.06 – "Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика" та профілю спеціалізованої вченої ради Д26.224.01.

На підставі вищевикладеного вважаю, що дисертаційна робота Целеня Богдана Ярославовича "Розвиток наукових основ застосування методу

гідродинамічної кавітації при обробці і дегазації рідин та водоочищенні” відповідає вимогам пунктам 7,8 та 9 «Порядку присудження та позбавлення ступеня доктора наук» Постанови Кабінету міністрів України від 17 листопада 2021 р. № 1197 (зі змінами внесеними згідно Постанови Кабінету Міністрів України, від 1 серпня 2025 р.) та паспорту спеціальності 05.14.06 – технічна теплофізика та промислова теплоенергетик, а її автор заслуговує на присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.14.06 – Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика.

Офіційний опонент,
завідувач кафедри теплоенергетики та
холодильної техніки
Національного університету
харчових технологій МОН України,
доктор технічних наук, доцент

Валентин ПЕТРЕНКО



пис(и) *Валентин Петренко*
завіряю
офіційний секретар *Г. Сидиш*
Н. А. Мельник