

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ІНСТИТУТ ТЕХНІЧНОЇ ТЕПЛОФІЗИКИ

**ЦЕЛЕНЬ БОГДАН ЯРОСЛАВОВИЧ**

УДК 532.5:536.7+66.063+628.16+628.3+662.613

**РОЗВИТОК НАУКОВИХ ОСНОВ ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ  
ГІДРОДИНАМІЧНОЇ КАВІТАЦІЇ ПРИ ОБРОБЦІ І ДЕГАЗАЦІЇ РІДИН ТА  
ВОДООЧИЩЕННІ**

05.14.06 – технічна теплофізика та промислова теплоенергетика

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Київ – 2025

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті технічної теплофізики НАН України, м. Київ.

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор,  
**Ободович Олександр Миколайович**,  
Інститут технічної теплофізики НАН України,  
завідувач відділу тепломасообміну в дисперсних системах.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор,  
**Туз Валерій Омелянович**,  
Національний технічний університет України «Київський  
політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», завідувач  
кафедри атомних електричних станцій і інженерної фізики.

доктор технічних наук, доцент,  
**Петренко Валентин Петрович**,  
Національний університет харчових технологій, завідувач  
кафедри теплоенергетики та холодильної техніки.

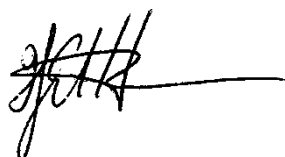
доктор технічних наук, професор,  
**Приймак Олександр Вікторович**,  
Київський національний університет будівництва і архітектури,  
декан факультету інженерних систем та екології.

Захист відбудеться «18» грудня 2025 р. о 11<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.224.01 Інституту технічної теплофізики Національної академії наук України за адресою: м. Київ, вул. М. Капніст, 2а.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Інституту технічної теплофізики НАН України за адресою: м. Київ, вул. М. Капніст, 2а та на сайті <https://ittf.kiev.ua/specializovani-vcheni-radi-2023/>

Автореферат розісланий «12» листопада 2025 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради Д 26.224.01,  
член-кор. НАН України, д.т.н., проф.



Жанна ПЕТРОВА

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Створення нових енергоефективних технологій для обробки і очищення рідин є одним з пріоритетних напрямків наукових досліджень і відповідає сучасним вимогам промислового виробництва. Реалізація сформульованих на базі комплексних наукових досліджень нових концепцій і детальне вивчення перебігу фізичних явищ на мікрорівні створює передумови для цілеспрямованого керування технологічними процесами і забезпечує оптимальні умови їх перебігу. Аналіз традиційних методів дегазації рідин показав відсутність енергоефективного і високопродуктивного промислового обладнання для їх реалізації. Інноваційні методи дегазації рідин, що базуються на використанні ефектів ультразвукової кавітації забезпечують високу енергоефективність при відносно низькій продуктивності і використовуються, як правило, в наукових дослідженнях. Застосування ефектів гідродинамічної кавітації забезпечує передумови для створення енергоефективного і високопродуктивного обладнання для дегазації рідин. Однак на сьогоднішній день існуючі математичні моделі, що описують перебіг швидкоплинних гідродинамічних кавітаційних явищ, через низку припущень, зокрема про монодисперсність кавітаційних бульбашок, не дозволяють в повній мірі забезпечити достовірність результатів вносячи суттєву похибку в розрахунки ускладнюючи вибір оптимальних конструктивних і режимних параметрів гідродинамічних кавітаційних реакторів. Також припущення про нестисливість рідини не дозволяє з високою точністю описувати перебіг стадії колапсу бульбашки, що важливо при реалізації динамічної і руйнівної дії кавітації на рідини при інтенсифікації перебігу масообмінних процесів, диспергуванні емульсій і суспензій тощо.

З метою підвищення ефективності і продуктивності вищезгаданих процесів запропоновано застосовувати механізми започаткованого в Інституті технічної теплофізики НАН України принципу дискретно-імпульсного введення енергії (ДІВЕ). Даний принцип передбачає створення умов для раціонального використання введеної в апарат енергії для виконання корисної роботи і дозволяє практично реалізувати переваги часової і просторової дискретизації введеної в апарат енергії для інтенсифікації технологічних процесів в гетерогенних дисперсних середовищах при мінімальних непродуктивних енерговитратах.

Тому створення сучасних енергоефективних і високопродуктивних технологій для очищення і обробки рідин з метою їх застосування для інтенсифікації перебігу процесів дегазації, водопідготовки, диспергування тощо є актуальним завданням і вимагає проведення комплексних наукових досліджень.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконувалася у відповідності з науковою тематикою Інституту технічної теплофізики НАН України і безпосередньо пов'язана з державними тематиками у яких автор брав участь як виконавець та відповідальний виконавець: «Розроблення технічних засад нової високоєфективної 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» (0123U100945), «Синергетичний ефект імпульсного впливу в гідродинамічних і тепломасообмінних процесах технологій диспергування та гомогенізації» (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» (0122U002062), «Дослідження процесів трансформації енергії в рідких гетерогенних системах при використанні методу дискретно-імпульсного введення енергії» (0117U000949), «Теоретичні і експериментальні дослідження тепломасообміну в технологічних процесах з використанням методу дискретно-імпульсного введення енергії (ДІВЕ)» (0115U000386), «Розроблення і впровадження дослідного зразка установки нейтралізації конденсату продуктів згорання природного газу» (0113U006201), «Розроблення двокамерної установки для безреагентної нейтралізації кислих конденсатів продуктів згорання газу в опалювальних та промислових котельнях» (0115U005525), «Розробка методів інтенсифікації процесів гідратації, гідролізу і екстракції на основі використання механізмів дискретно-імпульсного введення енергії» (0112U004699), «Дослідження впливу кавітаційних ефектів в апаратах ДІВЕ на фізико-хімічні властивості водних систем» (0115U005178), «Оптимізація енергоефективності в апаратах вакуумного та екструзійного типів» (0109U005924), «Дослідження тепломасообміну при дискретно-імпульсному вводі енергії в гетерогенні системи з метою розробки нанотехнологій і їх реалізації» (0107U002880).

**Мета і задачі дослідження:** розвиток наукових основ застосування механізмів гідродинамічної кавітації в багатофазних дисперсних середовищах в процесах дегазації рідин, водоочищення, створення альтернативних видів палива із використанням експериментальних і теоретичних методів дослідження.

Для досягнення поставленої мети були поставлені та вирішені наступні **задачі дослідження:**

- 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 природно 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 стислій рідині з урахуванням ефектів сферичного гідравлічного удару; створити математичні моделі для розрахунку сопла Вентурі та роторно-пульсаційного апарата 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, 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.

**Об’єкт дослідження** – процеси обробки, дегазації та очищення рідин, що здійснюються з застосуванням гідродинамічної кавітації.

**Предмет дослідження** – фізико-хімічні та гідродинамічні закономірності впливу гідродинамічної кавітації на ефективність дегазації, обробки та очищення рідин, а також методи моделювання та інтенсифікації цих процесів.

**Методи дослідження.** Вирішення поставлених завдань в дисертаційній роботі досягнуто шляхом використання чисельних методів рішення диференціальних рівнянь, експериментальних методів та підконтрольною експлуатацією дослідного зразка обладнання.

**Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій** забезпечується використанням загальноприйнятих методик, що базуються на класичних аналітичних та чисельних методах. Проведена верифікація отриманих в роботі результатів на відповідність канонічним теплофізичним гідродинамічним процесам, а також з результатами сторонніх авторів.

#### **Наукова новизна роботи:**

1. Із застосуванням математичної моделі 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.

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 одиничної 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 одиничної бульбашки в

стисливій рідині. В модифіковане рівняння Релея–Плесета введено лише один параметр – коефіцієнт адіабатичної стисливості рідини  $\beta_{ad}$ , що залежить від температури. Це дає можливість більш точно оцінити величину стисливості рідини на границі с 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 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.

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. 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.

8. На основі модифікації моделей динаміки одиничної 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 альтернативі 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 НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»).

7. Створені субмоделі кавітаційних 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 НТУУ «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 методику розрахунку гідродинамічних кавітаційних реакторів на базі сопла Вентурі та роторно-пульсаційного апарата 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 НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»).

Практичне значення результатів роботи також 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) і роторно-імпульсний апарат (патент 99823 України на корисну модель).

**Особистий внесок здобувача.** У роботах, що виконані у співавторстві автор приймав активну участь у визначенні наукового напрямку досліджень, постановці завдань, проведенні аналітичних та чисельних досліджень, обробці отриманих результатів, проведенні експериментальних досліджень та їх обробці. Здобувач брав участь у формулюванні висновків і підготовці до публікації результатів дослідження.

Оглядові та порівняльні наукові результати, що викладені в дисертаційній роботі, отримані автором особисто, на основі проведення аналізу літературних та інформаційних джерел, а також результатів дослідних даних.

**Апробація результатів дисертації.** Основні наукові, теоретичні положення та практичні результати дисертаційної роботи доповідались і обговорювались, зокрема, на XVII Міжнародній науковій конференції «Удосконалення процесів і обладнання харчових та хімічних виробництв» м. Одеса, 2018 р., VII Міжнародній науково-практичній конференції «Інноваційні енерготехнології» м. Одеса, 2019 р., XVII Міжнародній науково-технічній конференції «Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування» м. Харків, 2021 р., VI Міжнародній науково-технічній конференції «Actual Problems of Renewable Energy, Construction and Environmental Engineering» Кельце, Польща, 2022 р., XIII Міжнародній онлайн-конференції «Проблеми теплофізики та теплоенергетики». м. Київ, 2023 р., зроблено наукову доповідь «Перспектива застосування способу дискретно-імпульсного введення енергії для дегазації рідин в комунальній енергетиці та промисловості» згідно пункту 2 Порядку денного «Наукові доповіді з найвагоміших фундаментальних та прикладних досліджень установ ВФТПЕ НАН України» на Загальних зборах відділення фізико-технічних проблем енергетики НАН України в Інституті електродинаміки НАН України 25 квітня 2023 року.

**Публікації.** За викладеними в дисертації результатами досліджень опубліковано 50 наукових праць, серед яких: розділи в 4 колективних монографіях, 22 статті у фахових наукових виданнях України, до наукометричних баз SCOPUS та Web of Science включено 7 публікацій, 5 патентів України на винахід, 1 патент України на корисну модель, а також 5 публікацій у збірниках матеріалів міжнародних конференцій.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота 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 рисунки та 38 таблиць.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У *вступі* обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, визначено її зв'язок з науковими програмами, планами і темами, сформульовано мету і основні завдання досліджень, розглянуто об'єкт, предмет та методи досліджень, визначено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів. Наведено дані про апробацію результатів дисертаційної роботи, відомості про особистий внесок автора, опубліковані результати, структуру та обсяг роботи.

У *першому* розділі зроблений огляд сучасного стану досліджень кавітаційних процесів і явищ, сучасного стану методів дегазації рідини і проблеми нейтралізації кислого конденсату продуктів згоряння природного газу.

Розглянуто умови ініціювання і особливості перебігу кавітаційних процесів, які полягають в тому, що для реалізації явищ акустичної чи гідродинамічної кавітації необхідно швидко скинути тиск у рідині нижче тиску насиченої пари за даної температури ( $p_l < p_{sat}(T_l)$ ), що призводить до закипання рідини – формування та швидкого зростання ансамблю парогазових бульбашок – кавітаційного кластера. Подальше підвищення тиску до значень  $p_l > p_{sat}(T_l)$  призводить до швидкого стиснення бульбашок та їхнього колапсу з виділенням високоамплітудного імпульсу тиску ( $p_{imp} \propto 100 \div 500$  МПа). Проте, остаточний колапс парогазової бульбашки і наступне її руйнування відбувається лише за умови, що кількість неконденсованого газу в об'ємі бульбашки відносно мала. Зазвичай бульбашка стискається до певного мінімального розміру ( $R_{b\ min} \approx 1$  мкм), а потім інтенсивно зростає, завдяки тому, що на цій стадії тиск газу та пари всередині стисненої бульбашки в сотні разів перевищує зовнішній тиск в оточуючій рідині  $p_l \propto 1$  атм. При цьому остаточному колапсу бульбашки передують її затухаюча осциляція.

Незважаючи на широкі і різноманітні дослідження, проведені протягом кількох десятиліть в наукових лабораторіях різних країн ультразвукові (УЗ) технології не знайшли широкого впровадження в промислових масштабах через погану передачу акустичної енергії в об'ємі рідини і її нестабільний просторово-часовий розподіл та, головне, через високі експлуатаційні витрати і низьку енергетичну ефективність.

Здатність гідродинамічної кавітації (ГК) спричиняти потужні дискретно-імпульсні динамічні, термічні та хімічні впливи робить її одним з найбільш дієвих способів досягнення високих енергетичних показників при обробці рідинних дисперсних середовищ. З цих причин ГК, яка забезпечує високу ефективність, універсальність і масштабованість, розглядається як більш проста і доступна альтернатива акустичній кавітації при використанні у різних переробних галузях промисловості. За останні 30 років кількість наукових публікацій з цієї теми зросла майже в 600 разів. Серед них можна виділити такі основні напрямки, як застосування кавітації в очищенні стічних вод, системах водопідготовки, аерації та дегазації рідин, в енергетиці, біотехнології, хімічній, нафтопереробній, харчовій та інших галузях промисловості.

Різнманітні типи акустичних або гідродинамічних пристроїв в активній зоні яких виконуються зазначені вище умови виникнення кавітації розглядаються як кавітаційні реактори. Проведено порівняння основних типів гідродинамічних кавітаційних реакторів на прикладі діафрагми або пластини з одним чи декількома отворами, сопла Вентурі, РПА і пульсаційного диспергатора. Встановлено, що РПА є на сьогодні одним з перспективних типів ротаційних ГДКР. Основна їх перевага в тому, що при обертанні ротора його канали періодично збігаються з каналами статора, в результаті чого в оброблюваній рідині генеруються зсувні напруження, періодичні імпульси тиску та розрідження, дрібномасштабні пульсації кавітаційних бульбашок з наступним їх колапсом.

Також проаналізовано механізми впливу гідродинамічної кавітації на прикладі симетричного і асиметричного колапсу бульбашки, кавітаційну ерозію твердих поверхонь і вплив газовмісту на ступінь ерозійного пошкодження матеріалів. Проведено критичний аналіз існуючих математичних моделей кавітаційних процесів. Встановлено, що теоретичний аналіз роботи кавітаційних пристроїв проводиться на базі двох окремих взаємопов'язаних моделей. Перша – модель кавітації – описує еволюцію бульбашок в часі з моменту утворення і до завершального колапсу незалежно від типу кавітаційного реактора. Друга – модель гідродинаміки каналу – враховує конструктивні особливості кавітаційного реактора.

Модель кавітації базується на розв'язанні рівняння Релея–Плесета, яке однак, не враховує стисливість рідини, яка істотно впливає на радіальний рух стінки кавітаційної бульбашки до моменту її колапсу, коли швидкість стінки бульбашки  $dR/dt$  досягає екстремально високих значень, вищих за швидкість звуку в середовищі. Найбільш помітний внесок в цьому сенсі зробили Келлер і Колодонер; Келлер і Міксіс, а пізніше Просперетті з Лецці. Виведення модифікованого рівняння Релея–Плесета з урахуванням стисливості рідини детально розглядається в подальших розділах дисертації.

Модель гідродинаміки каналу описує зміну тиску  $p_1 = f(\tau)$  у фіксованому елементарному об'ємі рідини за час її проходження через канали змінної геометрії. Розраховані в даній моделі значення входять в рівняння Релея–Плесета як аналітична залежність  $p_\infty = f(\tau)$ , що забезпечує можливість його чисельного розв'язання і дозволяє визначити поведінку кавітаційного кластера в конкретному реакторі.

Особливі труднощі викликає теоретичний опис нестационарних гідродинамічних процесів в РПА, що пов'язано зі складністю конструкції таких пристроїв і необхідністю враховувати вплив різноманітних чинників на оброблюване середовище. Також слід зазначити, що масова витрата двофазного киплячого потоку через будь-який кавітаційний реактор періодично змінюється з часом, що визначає специфіку моделювання кавітаційного потоку.

У промисловому виробництві дегазація рідини часто є необхідним технологічним етапом для забезпечення вимог щодо якості продукту, збільшення терміну служби обладнання, скорочення витрат на технічне обслуговування та підвищення ефективності технологічних процесів.

Проаналізовано сучасний стан методів дегазації рідини на прикладі традиційних методів (хімічних, фізичних і механічних) та методів кавітаційної дегазації (акустичної і гідродинамічної), їх переваги і недоліки. Встановлено, що при деаерації використовується велика кількість газу, теплоти, вакууму або їх комбінації для видалення повітря з води, що призводить до високих витрат енергії, вартості обслуговування та низької продуктивності, тому існує потреба у розробленні і впровадженні у промисловість інноваційних методів дегазації рідин, більш продуктивних і ефективних, ніж існуючі на сьогодні традиційні методи. Зі сторони науковців та спеціалістів сьогодні спостерігається підвищений інтерес щодо можливості і переваг застосування методів кавітаційної дегазації рідин.

Розглянуто експериментальні дослідження впливу ефектів гідродинамічної кавітації на дегазацію гідравлічних рідин для збільшення їх модуля пружності, інтенсифікації кавітаційних ефектів, видалення небажаного газу. Також проведено огляд патентів в даному напрямку. Встановлено, що метод кавітаційної дегазації є перспективною альтернативою для заміни традиційних термічних і вакуумних деаераторів з точки зору суттєвого зниження енергетичних та капітальних витрат.

Проведено аналіз сучасного стану проблеми нейтралізації кислого конденсату продуктів згоряння природного газу. Встановлено, що кислий конденсат, який утворюється при спалюванні природного газу, на сьогоднішній день не знаходить застосування у промисловості і надходить в стічні води підприємства. Найчастіше для нейтралізації кислого конденсату використовують доломіт, який є відносно доступним і дешевим матеріалом. Проте, за своїм складом кислий конденсат, в основному, є водним розчином діоксиду вуглецю з незначною кількістю домішок оксидів азоту і не містить солей жорсткості. З огляду на це, розглянуто можливість його нейтралізації з метою використання для технологічних потреб підприємств, а також як води для живлення водогрійних котлів промислових і комунальних котельних. Встановлено, що для цієї мети потенційно придатні масообмінні процеси, що не передбачають використання сторонніх реагентів і можуть бути реалізовані в декарбонізаторах, деаераторах тощо. Недоліком апаратів даного типу є високі енерговитрати і вартість, великі габарити, складність в обслуговуванні і ремонті, а також необхідність індивідуального проектування для конкретних умов. Таким чином, вивчення застосування способу кавітаційної дегазації для нейтралізації конденсату є перспективним в цьому напрямку.

Виходячи з результатів опрацювання літературних джерел, було визначено мету дисертаційної роботи та сформульовані задачі, які в ній вирішуються.

У *другому* розділі розглядаються процеси кавітації і теоретичний опис динаміки одиничної бульбашки (модель ДОБ) та ансамблю бульбашок (модель ДБА) в межах започаткованого в ІТТФ НАН України принципу дискретно-імпульсного введення енергії (ДІВЕ). Цей принцип передбачає створення умов раціонального використання введеної в апарат енергії для виконання корисної роботи і максимального зниження непродуктивних енергетичних втрат та забезпечує раціональні шляхи перетворення введеної енергії в короткочасні імпульси високої потужності, дискретно розподілені в робочому об'ємі. Зниження енергетичних витрат досягається за рахунок концентрування введеної енергії безпосередньо на поверхні окремих дисперсних часток (тверді частинки або агрегація мікрочастинок, краплі іншої рідини, газові бульбашки, супрамолекулярні структури), саме там, де необхідно виконати корисну роботу. На сьогоднішній час моделі ДОБ та ДБА можна розглядати як одні з найбільш детально розроблених математичних моделей, що дозволяють з задовільною точністю прогнозувати поведінку одичних бульбашок та кавітаційних кластерів за будь-яких режимних параметрів.

Обґрунтовано, що застосування сукупності бульбашок, які містяться в рідині і динамічно розвиваються, повинно розглядатись як окремий спосіб реалізації принципу ДІВЕ, з якого логічно випливає поняття кавітації як потужного механізму цього принципу.

В межах модифікації моделі ДОБ та ДБА проведено дослідження щодо врахування стисливості рідини і геометрії каналу, досліджено кінетику кавітаційного закипання рідини і умови активації газових мікрозародків.

Встановлено, що існуючі моделі для опису динаміки бульбашки в нестисливій рідині призводять до деяких неправдоподібних висновків, а наявні модифікації рівняння Релея–Плесета для врахування стисливості рідини недостатньо точно описують даний процес. На базі подальшої модифікації математичної моделі ДОБ, яка без використання регулюючих параметрів дозволяє адекватно прогнозувати поведінку одиничної парової бульбашки при зміні зовнішнього тиску, шляхом застосування модифікованого рівняння Релея–Плесета, що враховує стисливість рідини, вперше проведено моделювання динаміки парогазових бульбашок у стисливій рідині з врахуванням ефектів сферичного гідравлічного удару.

Вперше виведено рівняння, яке описує динаміку одиничної сферичної бульбашки в стисливій рідині

$$\frac{dv_R}{d\tau} = \frac{p_R - p_{l\infty} + 3/2 (p_R - p_{l\infty})^2 \beta_{ad} - 3/2 \rho v_R^2}{\rho R}. \quad (1)$$

При значенні коефіцієнта адіабатичної стисливості  $\beta_{ad} = 0$  рівняння (1) зводиться до класичного рівняння Релея–Плесета, що описує динаміку бульбашки в нестисливій рідині.

$$\frac{dv_R}{d\tau} = \frac{p_R - p_{l\infty} - 3/2 \rho v_R^2}{\rho R}. \quad (2)$$

При розрахунку динаміки бульбашки в стисливій рідині рівняння (1) використовується в моделі ДОБ і в моделі ДБА замість рівняння Релея–Плесета (2) разом з іншими рівняннями системи, яка обов'язково містить незалежне рівняння зміни у часі зовнішнього тиску.

На рис. 1 представлено розраховані за моделлю ДОБ порівняльні характеристики осциляції бульбашок у нестисливій та стисливій воді для активованої мікробульбашки з початковими радіусом  $R_0 = 7,5$  мкм. Розрахунок проводився з використанням рівняння Релея–Плесета у формі (2) для нестисливої рідини та рівнянням (3) для стислої рідини. Зміну зовнішнього тиску, що обумовлює активацію зростання і подальше стиснення бульбашок показано на рисунках 1 а та 1 б пунктирними лініями.

Проведений термодинамічний аналіз процесів ізотермічного та ізобаричного закипання рідини показує, що початок і розвиток даних процесів залежить від концентрації та розміру газових мікрозародків, які є потенційними центрами кипіння. У будь-якій рідині за нормальних умов знаходиться велике число парогазових бульбашок різного розміру з діаметрами від 10 нм до 10 мкм. Бульбашки з радіусом  $R_0 > 3 \div 5$  мкм досить швидко спливають під дією сили Архімеда, але бульбашки з радіусами  $R_0 < 1$  мкм можуть стабільно перебувати в рідині протягом доволі тривалого періоду часу.

Проаналізувавши умову рівноваги в системі «парогазові бульбашки – рідина» в процесі кавітаційного закипання в ізотермічному режимі встановлено, що при значному скиданні тиску в рідині виникне ситуація, коли тиск на зовнішню

поверхню бульбашки з боку рідини стане меншим за тиск насиченої пари всередині бульбашки  $p_{sat}(T_{l0}) = const$ . Цій критичній ситуації відповідає умова

$$p_{sat}(T_{l0}) \geq p_{lcr} + 2\sigma/R_{1cr}. \quad (3)$$

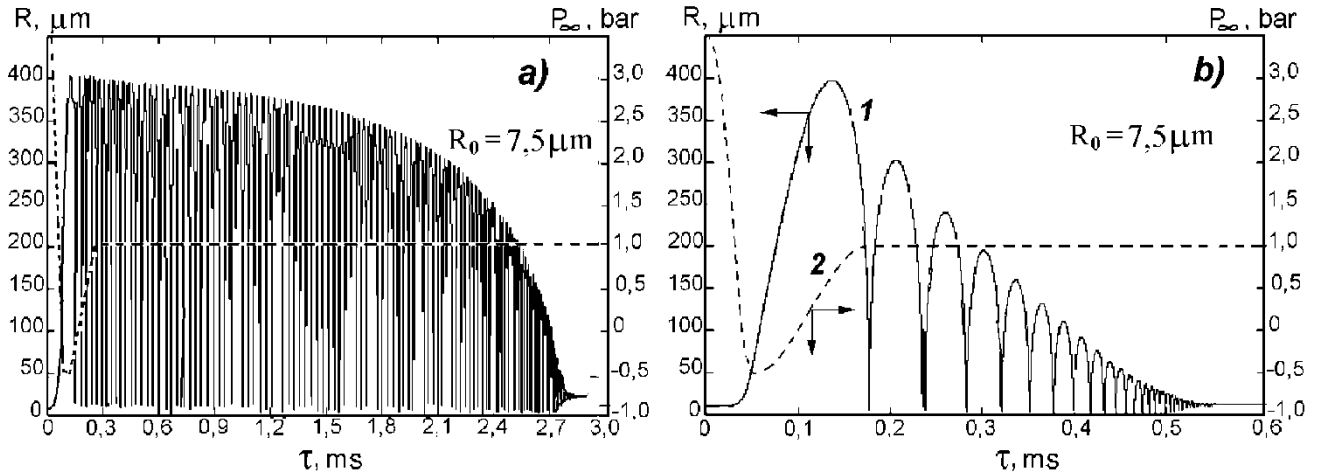


Рис. 1. Зміна з часом радіуса парогазової бульбашки в процесі її осциляції у воді з урахуванням нестисливості (а) та стисливості рідини (б). Пунктирною лінією показано зміну зовнішнього тиску рідини. Розрахунок за моделлю ДОБ за умов  $R_0 = 7,5$  мкм;  $p_0 = 4,0$  атм;  $p_a = 1$  атм;  $T_{l0} = 293$  К.

Нерівність (3) містить значення критичного тиску  $p_{lcr}$  та критичного поточного радіуса  $R_{cr}$ , при яких бульбашка почне безповоротно і необмежено зростати – стає **активованою**. Величина  $p_{lcr}$  визначає граничний рівень, до якого необхідно і достатньо знизити тиск у рідині для активації бульбашок з заданим початковим радіусом  $R_0$ . Для розрахунку значення критичного тиску  $p_{lcr}$  та відповідного йому значення критичного радіуса  $R_{cr}$  початково стабільної мікробульбашки з заданим радіусом  $R_0$  застосовано рівняння (4), представлене у вигляді

$$p_l(\tau) = \frac{p_{g0} \cdot R_0^3}{R^3(\tau)} - \frac{2\sigma}{R(\tau)} + p_{sat}(T_{l0}), \quad (4)$$

Дане параметричне рівняння дає можливість розрахувати критичні значення  $p_\tau = p_{lcr}$  та  $R_\tau = R_{cr}$ , які відповідають початку незворотного зростання бульбашки, а також описати її подальшу еволюцію після активації:

$$R_{cr} = \sqrt{\frac{3p_{g0} \cdot R_0^3}{2\sigma}} = \sqrt{\frac{3p_{g0} \cdot R_0^2}{2\sigma/R_0}} = R_0 \sqrt{\frac{3p_{g0}}{p_{\sigma 0}}}. \quad (5)$$

$$p_{lcr} = p_{sat}(T_{l0}) - p_{\sigma 0} \sqrt{\frac{4p_{\sigma 0}}{27p_{g0}}}. \quad (6)$$

Дані рівняння доповнюють базові рівняння моделей ДОБ і ДБА.

На рис. 2 представлено розраховане за рівнянням (6) значення  $p_{lcr}$ , що визначають початок необмеженого зростання парогазових зародків у воді з температурою  $T_{l0} = 20$  °С в залежності від їх початкового рівноважного радіуса  $R_0$ .

З рис. 2 видно, що для активації бульбашок з радіусами  $R_0 < 9$  мкм тиск потрібно знизити до негативних значень ( $p_{lcr} < 0$ ). З формули (2) можна розрахувати, що мікробульбашки з радіусом  $R_0 = 0,1$  мкм активуються при

від'ємному тиску  $p_{l\ cr} = -0,55$  МПа, а нанобульбашки з радіусом  $R_0 = 20$  нм – при від'ємному тиску  $p_{l\ cr} = -3$  МПа. Також розраховано зміну величини критичного тиску активації  $p_{l\ cr}$  (рис. 3), що суттєво залежить від температури рідини  $T_{l0}$  оскільки рівняння (6) містить тиск насиченої пари  $p_{sat}(T_{l0})$ , який стрімко зростає з температурою. З підвищенням  $T_{l0}$  активація бульбашок однакового розміру починається при більш високих значеннях тиску  $p_{l\ cr}$ . Формули (5) і (6) можуть бути застосовані для будь-якої рідини, якщо відомі температурні залежності тиску її насиченої пари  $p_{sat} = f(T_{l0})$  та поверхневого натягу на межі з газом  $\sigma = f(T_{l0})$ . Параметри активації бульбашки залежать також від фізико-хімічних властивостей конкретного неконденсованого газу, який розчинений в даній рідині і входить до складу парогазової суміші всередині бульбашки.

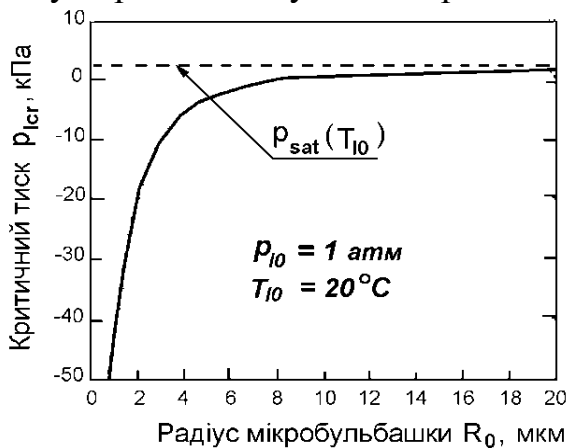


Рис. 2. Залежність критичного тиску  $p_{l\ cr}$  від радіуса парогазових бульбашок  $R_{0r}$ , які знаходяться у стані рівноваги у воді з температурою  $T_{l0} = 20$  °С під атмосферним тиском ( $p_{l0} = 100$  кПа).

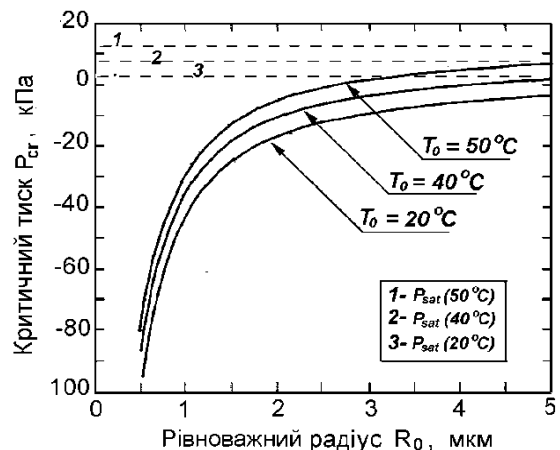


Рис. 3. Залежність критичного тиску  $p_{l\ cr}$  від початкового радіуса мікробульбашок  $R_0$  для трьох значень температури води:  $T_{l0} = 20$  °С,  $40$  °С та  $50$  °С.

Виконано моделювання сопла Вентурі як ГДКР з урахуванням гідродинамічних опорів на всіх ділянках каналу. Визначено, що при застосуванні сопла Вентурі для кавітаційної обробки рідини чи рідинних сумішей з урахуванням оптимальних значень параметрів  $\alpha_{con}$ ,  $\alpha_{dif}$  та  $L_1$ , існує лише три чинники, які забезпечують можливість керування інтенсивністю кавітаційних процесів. Це тиск на вході в сопло  $p_0$ , тиск на виході з сопла  $p_k$ , який можна змінювати шляхом зміни отвору діафрагми, а також діаметр горловини  $d_1$ . Використовуючи рівняння Бернуллі розраховуються швидкості потоку  $v_0$ , і тиск на виході з горловини  $p_1$ , який, власне, і визначає інтенсивність кавітаційних процесів в соплі.

На рис. 4 зображено, зміну тиску і швидкості в потоці рідини при її проходженні через сопло Вентурі в залежності від ступеня звуження каналу  $d_1/d_0$ . З рисунку 4 а видно, що при високих швидкостях потоку на вході в сопло і достатньому звуженні каналу тиск в рідині досягає високих негативних значень, забезпечуючи активацію великої кількості газових зародків та більш інтенсивні ефекти кавітації.

Розглянуто основні гідродинамічні ефекти, що відбуваються в каналах і зазорах трьохциліндрового РПА з двома роторами і одним статором, застосованого як ротаційний ГДКР для обробки рідинних дисперсних середовищ. Встановлено, що

кавітаційні явища, які виникають в проточних каналах РПА, тотожні явищам, які спостерігаються в УЗ кавітаційних реакторах, але з частотою на два порядки меншою, ніж в акустичних реакторах. З цієї точки зору РПА можна водночас розглядати як ГДКР, та як акустичний реактор. Також, при обробці рідинних сумішей в РПА створюється *синергетичний ефект* кавітаційної дії в каналах роторів і статора та дії зсувних напружень в міжциліндрових зазорах. Обидва ці чинники розглядаються як окремі жорсткі механізми ДІВЕ.

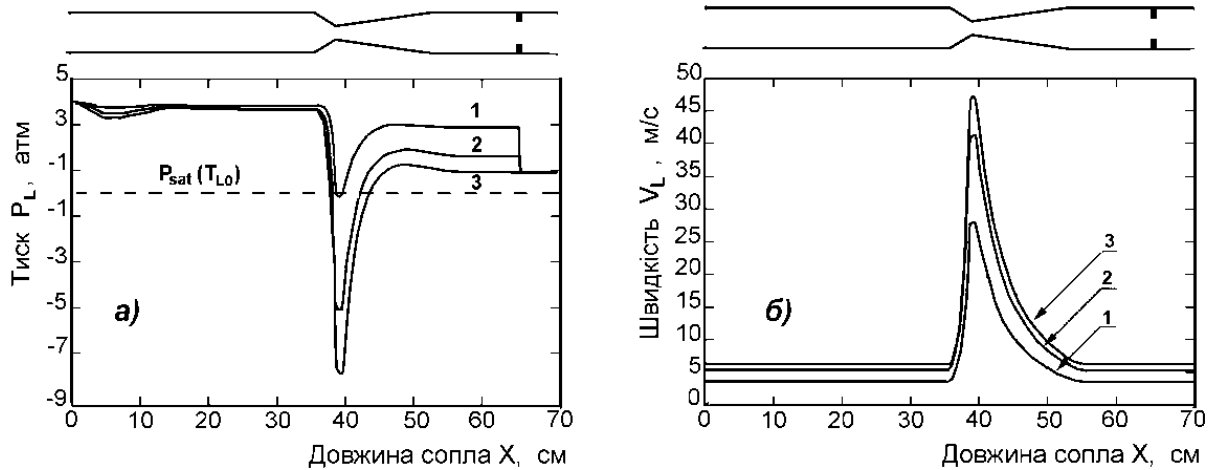


Рис. 4. Розподіл тиску  $p_l = f(x)$  (а) і швидкості  $v_l = f(x)$  (б) в потоці рідини по довжині сопла Вентурі в залежності від ступеня звуження каналу: **1** –  $d_1/d_0 = 0,78$ ; **2** –  $d_1/d_0 = 0,50$ ; **3** –  $d_1/d_0 = 0,42$ .

Для оцінки динамічного впливу на дисперсії при їх проходженні в складі рідини через зазори і канали РПА виконано окремо теоретичний аналіз гідродинамічних процесів, які перебігають в міжциліндрових зазорах апарата, а також кавітаційних ефектів в каналах ротора і статора.

Незважаючи на суттєві досягнення в області чисельних досліджень процесів деформації і дроблення крапель в зсувних течіях досі не визначено механізми руйнування краплі і їх залежність від параметрів системи, включаючи ступінь деформації краплі, а головне, як відбувається деформування та руйнування краплі і газових бульбашок при високих швидкостях зсуву, які відповідають умовам течії в зазорах РПА. В певній мірі деякі відповіді на ці питання дає розроблена нами математична модель деформування та руйнування рідких та газових дисперсій в зсувних течіях, що базується на основних положеннях базової моделі деформації крапель рідини в нестационарних газових та рідинних потоках і вперше дозволяє описати процеси деформації і руйнування дисперсій в зсувних течіях в широкому інтервалі зміни режимних параметрів.

В межах розробленої моделі отримано простий критерій руйнування крапель в зсувних течіях. Деформація крапель обумовлена дією трьох сил –  $F_\xi$ ,  $F_\sigma$  та  $F_\mu$ . Деформована крапля зберігає стабільну форму видовженого еліпсоїда за умови, що складова  $F_\xi$  і зворотна сила  $F_\sigma$  стають рівними. При деформуванні краплі у форму сплющеного еліпсоїда капілярна сила дійсно безмежно зростає зі збільшенням ступеня деформації, однак при деформації краплі у форму видовженого еліпсоїда ця закономірність порушується. Згідно з формулою (7) пропорційність пружної

капілярної сили ступеню деформації дотримується лише до певного значення ступеня деформації  $(a/R)_{cr}$ .

$$F_{\sigma} = \sigma \frac{dS}{dr_s} = \frac{16\pi R^3 \sigma}{3a^2} \left[ \frac{0,5 \cdot (R/a)^{3/2} (1 - 4 \cdot (R/a)^3) \cdot \arcsin e}{e^3} + \frac{1,5}{e^2} - 1 \right], \quad (7)$$

Перевищення цього критичного значення призводить до плавного зниження капілярної сили  $F_{\sigma}$ . Отже, якщо за будь-яких заданих режимних параметрів ступінь деформації краплі або газової бульбашки перевищить критичне значення  $(a/R)_{cr}$ , відбувається її незворотне розтягування з подальшим руйнуванням.

Аналіз показав, що значення  $(a/R)_{cr}$  є суто геометричним фактором, який не залежить від теплофізичних характеристик обох фаз і режимних параметрів потоку, та може розглядатися як фізична константа, що визначається як  $(a/R)_{cr} = 2,2$ .

Для підтвердження достовірності і універсальності цього параметра з застосуванням рівнянь моделі було проведено обчислювальний експеримент по розрахунку залежності капілярної сили від ступеня деформації краплі для різних дисперсних систем «рідина в рідині», відмінних за своїми теплофізичними характеристиками.

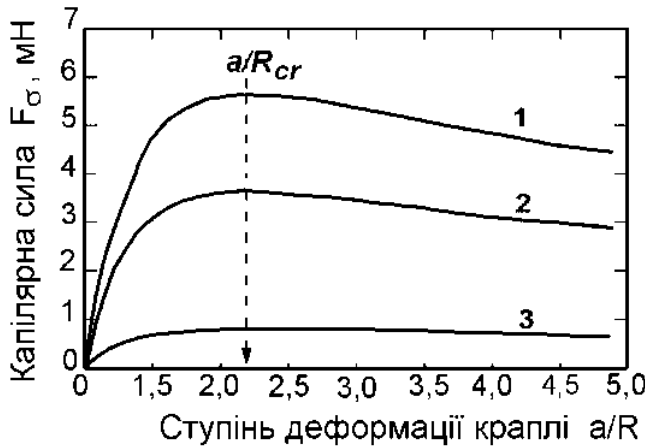


Рис. 5. Характер зміни величини капілярної сили  $F_{\sigma}$  в залежності від ступеня деформації  $a/R$  в процесі деформації крапель в зсувних потоках:

- 1 –  $\rho_d = 965 \text{ кг/м}^3$ ;  $\rho_c = 980 \text{ кг/м}^3$ ;  
 $\mu_d = 0,05 \text{ Па} \cdot \text{с}$ ;  $\mu_c = 0,62 \text{ Па} \cdot \text{с}$ ;  
 $\sigma = 9,1 \text{ мН/м}$ ;  $R = 0,3 \text{ мм}$ ;  $G_{sh} = 0,2 \text{ с}^{-1}$ ;
- 2 –  $\rho_d = 800 \text{ кг/м}^3$ ;  $\rho_c = 1000 \text{ кг/м}^3$ ;  
 $\mu_d = 0,6 \text{ Па} \cdot \text{с}$ ;  $\mu_c = 1,0 \text{ Па} \cdot \text{с}$ ;  
 $\sigma = 35 \text{ мН/м}$ ;  $R = 0,3 \text{ мм}$ ;  $G_{sh} = 439 \text{ с}^{-1}$ ;
- 3 –  $\rho_d = 1000 \text{ кг/м}^3$ ;  $\rho_c = 1000 \text{ кг/м}^3$ ;  
 $\mu_d = 1,0 \text{ Па} \cdot \text{с}$ ;  $\mu_c = 200 \text{ Па} \cdot \text{с}$ ;  
 $\sigma = 29 \text{ мН/м}$ ;  $R = 1 \text{ мм}$ ;  $G_{sh} = 77 \text{ с}^{-1}$ .

докритичному режимі при числах  $Ca$  близьких до  $Ca_{cr}$  відповідає значенням  $a/R = 2,0 \div 2,3$ . Слід зазначити, що критерій руйнування крапель в зсувних течіях  $(a/R)_{cr} = 2,2$  одержано в рамках моделі з припущенням, що крапля на будь-якій

На рис. 5 представлено залежності капілярної сили  $F_{\sigma} = f(a/R)$ , розраховані за рівнянням (7) для трьох систем: 1 – краплі диметикону в касторовій олії; 2 – краплі толуолу у воді; 3 – краплі води у моторній олії при різних режимах. Одержані результати розкривають важливу, невідому раніше, особливість впливу капілярних сил на деформування краплі. З рисунку 5 видно, що при різних фізичних властивостях суцільної і дисперсної рідини максимум на кривих спостерігається при строго визначеному значенні  $(a/R)_{cr} = 2,2$ , яке відповідає початку незворотної деформації і наступному руйнуванню крапель і газових бульбашок в зсувних потоках різних рідин.

Аналіз фотографій і графічних даних по деформації крапель в зсувних течіях, наведених в роботах різних авторів, також вказує на те, що форма крапель стабілізованих в

стадії деформації має форму еліпсоїда обертання. Однак, в реальних течіях, особливо при високих ступенях деформації краплі, достовірність цього припущення може дещо порушуватися.

Для опису кавітаційних ефектів в каналах РПА створено 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. Це дає змогу описати розподіл лінійних швидкостей потоку і тисків по довжині каналів РПА в заданий момент часу або ж описати зміну цих параметрів з часом в певній локальній точці. Дана модель також може бути застосована як окрема субмодель в загальній моделі, що описує динаміку парогазових бульбашок.

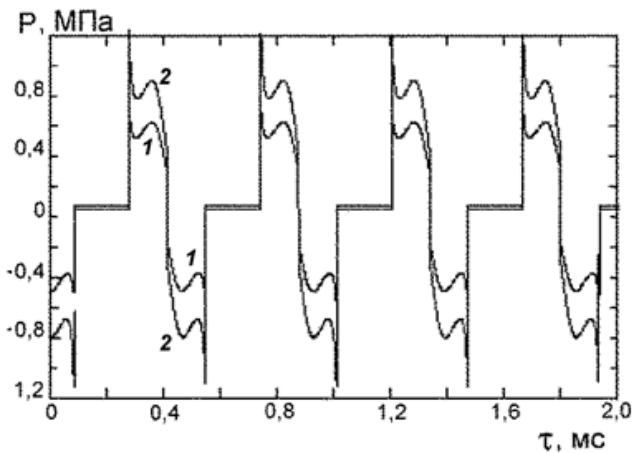


Рис. 6. Зміна тиску з часом в каналах першого ротора (крива 1) і статора (крива 2) протягом чотирьох періодів перекриття отворів роторів і статора.

На рис. 6 показано розраховану за рівняннями моделі зміну в часі протягом чотирьох періодів перекриття отворів тиску рідини всередині каналів першого ротора (крива 1) і статора (крива 2). З рисунку видно, що в процесі перекриття каналів тиск в рідині може спадати до значень  $p_l < p_{sat}(T)$ , що призведе до активації парогазових мікробульбашок з наступним їх зростанням і завершальним колапсом. Найбільше зниження тиску має відбуватись на вході в канал II ротора в момент перекриття каналів. Це зумовлює інтенсивне зростання у розмірі великої сукупності парогазових бульбашок в рідині, що

може призвести до інверсії структури потоку, тобто перетворення її з бульбашково-рідинної в крапельно-газову структуру. Якщо на вхід РПА надходить пересичена рідина з великою кількістю газових мікробульбашок, то на виході з РПА утворюється суміш водяної пари з нейтральним газом, в якій знаходиться велика кількість полідисперсних краплин рідини.

У *третьому* розділі наведені дослідження по застосуванню кавітаційних процесів для інтенсифікації гідродинамічного впливу при обробці рідин. З метою вирішення завдань щодо покращення якісних показників отримуваних продуктів були проведені дослідження впливу кавітаційних процесів в рамках застосування принципу ДІВЕ щодо приготування водовугільної суспензії як універсального водовугільного палива і зниження жорсткості води при її підготовці для живлення котлоагрегатів, що засвідчили високу ефективність його застосування. Для проведення досліджень як кавітаційний реактор було використано РПА спеціальної конструкції типу ротор-статор-ротор з можливістю зміни ширини зазорів між роторами і статором (в межах  $0,5 \div 0,7$  мм) шляхом встановлення між роторами

статора відповідного розміру та зміни частоти обертання роторів (в межах 1500÷3600 об/хв) застосовуючи частотний перетворювач (варіатор).

Основним недоліком будь-якого водовугільного палива (ВВП) є те, що воно придатне для спалювання в певному типі печах, котлах або двигунах, що потребує створення різних за складом та структурою ВВП. Виходом з цієї ситуації могло б стати створення універсального водовугільного палива (УВВП), придатного для різних типів енергетичних установок. Однією з основних вимог до такого виду палива є граничний і середній розміри частинок. Наприклад, для безпечної та довготривалої роботи газових турбін граничний розмір частинок не повинен перевищувати 30 мкм, а для двигунів внутрішнього згоряння – 3 мкм.

Для вирішення задачі отримання УВВП застосовано кавітаційний вплив і зсувні напруження, що є механізмами способу ДІВЕ та реалізовані на базі РПА і пульсаційного диспергатора як гідродинамічних кавітаційних реакторів.

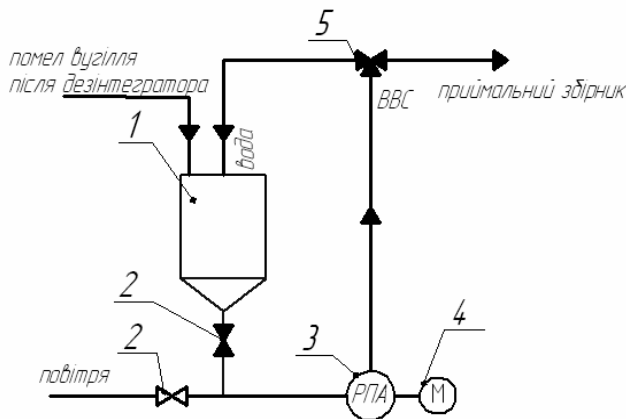


Рис. 7. Апаратурно-технологічна схема на базі РПА для обробки водовугільної суміші: 1 – приймальний бункер; 2 – двоходовий кран; 3 – РПА; 4 – електродвигун; 5 – трьохходовий кран.

Апаратурно-технологічна схема на базі РПА для обробки водовугільної суміші наведена на рис. 7. Дослідження проводили наступним чином. В приймальний бункер РПА 1 наливали воду і додавали подрібнене вугілля. Отриману суміш перемішували у бункері за допомогою пропелерної мішалки. Потім відкривали двоходовий кран 2 і вмикали РПА 3, який одночасно працює як відцентровий насос (РПА додатково оснащували крильчаткою). Водовугільна суміш циркулювала по контуру: приймальний бункер – РПА – приймальний бункер.

Обробку суміші в РПА проводили при різних розмірах зазору між статором і роторами в діапазоні від 700 до 500 мкм та швидкості обертання роторів 40÷60 с<sup>-1</sup> протягом 1÷15 циклів обробки, яку вибрано згідно поставленої вимоги, щоб розмір частинок в готовій суспензії не перевищував 3 мкм. Для досліджень використовували помел вугілля після дезінтегратора (розмір частинок не більше 500 мкм), яке змішували з водою до вмісту твердої фази в суспензії 50÷70 %.

Результати дослідження впливу величини зазору між статором і роторами, а також кількості циклів обробки в РПА на розмір частинок суспензії показали, що для досягнення розміру частинок дисперсної фази близько 3 мкм суміш вугілля у воді з вмістом твердої фази 50 % необхідно оброблювати в РПА протягом 8÷10 циклів при зазорі між статором і роторами 500 мкм. Подальше збільшення кількості циклів обробки практично не впливає на розмір частинок. Збільшення зазору між статором і роторами також не дозволяє досягнути необхідної дисперсності.

Результати дослідження впливу кількості циклів обробки в РПА та вмісту твердої фази в суспензії на розмір її частинок показали, що для отримання частинок вугілля не більше 3 мкм оптимальними є вміст твердої фази в суміші 70% та зазор між статором і роторами 500 мкм при 8 циклах обробки. Збільшення кількості циклів обробки практично не впливає на розмір частинок, а збільшення вмісту твердої фази більше 70 % недоцільне через високу в'язкість суспензії.

Результати дослідження впливу швидкості обертання роторів і кількості циклів обробки в РПА на розмір частинок суспензії показали, що для досягнення необхідних розмірів частинок вугілля  $1\div 3$  мкм потрібно здійснювати обробку суміші в РПА зі швидкістю обертання ротора  $50\text{ с}^{-1}$  протягом  $8\div 10$  циклів.

Визначено режимні параметри роботи обладнання для приготування УВВП. Встановлено, що для отримання суспензії з розміром дисперсних частинок до 3 мкм вугілля попередньо необхідно диспергувати в дезінтеграторі до розміру частинок 500 мкм. Після чого отриманий помел вугілля в кількості 70 % змішувати з водою в кількості 30 % та обробляти в РПА при швидкості обертання ротора  $50\text{ с}^{-1}$  протягом  $8\div 10$  циклів. При цьому зазор між статором і роторами повинен становити 500 мкм. Отримане УВВП може бути застосовуване для спалювання в котлах, печах, різному теплоенергетичному обладнанні, двигунах внутрішнього згоряння тощо.

Також проведено дослідження впливу гідродинамічної обробки з використанням створеного в ІТТФ НАН України кавітаційного реактора на базі модифікованого пульсаційного диспергатора як альтернативи РПА для готування водовугільного палива. Очевидна перевага диспергаторів мембранного типу полягає в тому, що вони, на відміну від РПА або апаратів із застосуванням відцентрових насосів, здатні обробляти високо абразивні суміші протягом тривалого часу експлуатації.

Загальна схема застосованого модифікованого пульсаційного диспергатора і принцип його роботи практично такі ж, як і в раніше розроблених в ІТТФ НАН України пульсаційних апаратів з активними мембранами. При цьому потужні кавітаційні ефекти при роботі апарата створюються не завдяки додатковому споживанню енергії, а на основі незначних, на перший погляд, змін в конструкціях апарата: 1) замість двох мембран в камері застосовується лише одна гнучка мембрана, яка розділяє рідинний та газовий тракти; 2) в каналі рідинного тракту встановлюється сопло Вентурі заданої геометрії. В рідинному тракті таких апаратів ініціюється сукупність потужних механізмів ДІВЕ: адіабатне закипання, кавітація, гідравлічний удар, дія зсувних напружень, а також інтенсивна турбулізація суміші. При цьому, на відміну від попередніх модифікацій пульсатора з мембраною, основні визначальні динамічні ефекти відбуваються не в робочій камері, а в трубі кавітаційного реактора.

Для проведення дослідження як кавітаційний реактор було використано апарат з двома активними мембранами оснащений соплом Вентурі (рис. 8). Хоча модифікація апарата з однією активною мембраною забезпечує більш високий кавітаційний вплив на рідину в даному дослідженні його не використовували через особливості оброблюваної сировини і кавітаційний вплив на рідину здійснювався в соплі Вентурі. В експерименті використовували буре демінералізоване вугілля марки Б2 подрібнене на кульовому млині до розміру частинок  $d = 0\div 4$  мм та

водопровідну воду для приготування водовугільної суспензії з заданою масовою концентрацією вугілля/вода  $c_m = 56\%$ ,  $c_m = 60\%$  та  $c_m = 65\%$ . Мокре подрібнення частинок вугілля в кавітаційному пульсаційному диспергаторі здійснювали до розмірів  $d \leq 40$  мкм. Для цього 15 л попередньо приготовленої грубодисперсної водовугільної суспензії (ВВС) заливали в завантажувальну ємність апарата (резервуар). Обробку суміші проводили при температурі рідини  $25^\circ\text{C}$ . В процесі обробки величину тиску в ресивері низького тиску (РНТ) підтримували на рівні  $p_{\text{РНТ}} \propto 2$  кПа, а величину тиску в ресивері високого тиску (РВТ) – в інтервалі  $p_{\text{РВТ}} = 0,3 \div 0,5$  МПа. На даному етапі дослідження задача полягала у досягненні потрібного ступеня дисперсності ( $d \leq 40$  мкм) за можливо короткий час.

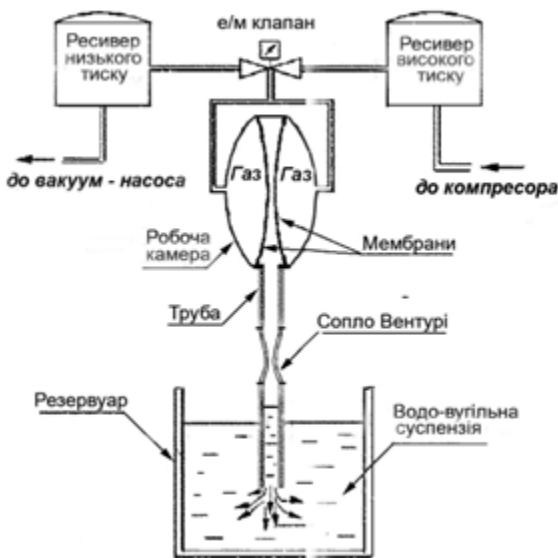


Рис. 8. Принципова схема кавітаційного пульсаційного диспергатора

Відбір проб суспензії безпосередньо з ємності диспергатора здійснювали через 10 хв, 20 хв та 30 хв після початку обробки. Дисперсійний аналіз ВВС проводили методом мікроскопічного аналізу на світловому мікроскопі Carl Zeiss Axio Imager Z1m. Обробку даних виконували за стандартною методикою. Динамічна та умовна в'язкості одержаної ВВС визначалися, відповідно, за допомогою ротаційного віскозиметра ВСН-3 та віскозиметра ВЗ-246. Оскільки в задачу дослідження не входило визначення властивостей ВВС як неньютонівської рідини вимірювання динамічної в'язкості на віскозиметрі проводили при стандартній кутовій швидкості обертання гільзи 200 об/хв. Показник рН отриманих зразків тонкодисперсної ВВС контролювали за

допомогою рН-метра Hanna Instruments HI 8424 N.

Наведені криві розподілу дисперсності частинок ВВС (рис. 9) показують, що протягом 20 хв обробки в диспергаторі можна отримувати фракційний склад палива, що відповідає вимогам використання для ТЕС і котельних. Обробка протягом 30 хв дозволяє досягти необхідних показників для ТЕЦ. Тобто, в залежності від вимог до дисперсного складу суспензії можна використовувати різну тривалість обробки.

Зміну рН ВВС з концентрацією вугілля 56 % в залежності від часу обробки представлено на рис. 10. Підвищення рН середовища в умовах кавітаційної обробки також спостерігали інші дослідники, які пояснюють це утворенням вільних іонів та радикалів. При цьому відбувається виділення гумінових кислот. Такі сполуки володіють вираженими поверхнево-активними властивостями і забезпечують стабільність отриманих ВВС проти розшарування з плином часу. Тому використання кавітаційної стадії обробки може суттєво мінімізувати або повністю скоротити об'єм використання поверхнево-активних домішок.

Седиментаційну стійкість зразків ВВС різної концентрації одержаних після 30 хв обробки визначали по висоті шару осадження дисперсної твердої фази і зміні

технологічних характеристик з плином часу. Отримані залежності представлені на рис. 11 показують стабільність ВВС протягом 5-6 діб.

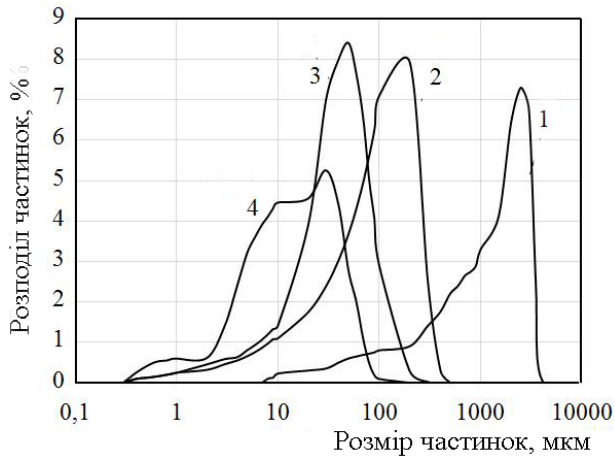


Рис. 9. Диференційні криві розподілу за розмірами вугільних частинок ВВС в залежності від часу обробки: 1 – вихідний зразок; 2 – 10 хв обробки; 3 – 20 хв обробки; 4 – 30 хв обробки.

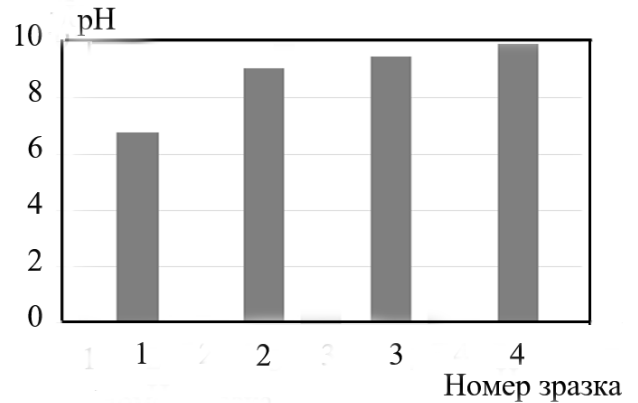


Рис. 10. Зміна рН ВВС з концентрацією вугілля 56 % в залежності від часу кавітаційної обробки: 1 – вихідний зразок; 2 – 10 хв обробки; 3 – 20 хв обробки; 4 – 30 хв обробки.

Згідно рекомендацій, в'язкість ВВС має знаходитись в межах до 1 Па·с. Отже параметрам в'язкості задовільняють всі отримані зразки, окрім тих, що пройшли 30-ти хвилинну обробку з масовою концентрацією більше 62% (рис. 12). Запропонований спосіб створення дрібнодисперсної водовугільної суспензії на основі кавітації потенційно може суттєво інтенсифікувати процес виробництва ВВС, знизити енергозатрати на його виробництво та забезпечити якість продукту, що відповідає вимогам теплоенергетичних підприємств. Попри те, що даний спосіб знаходиться на початковому етапі розробки, лабораторні дослідження показали його перспективність.

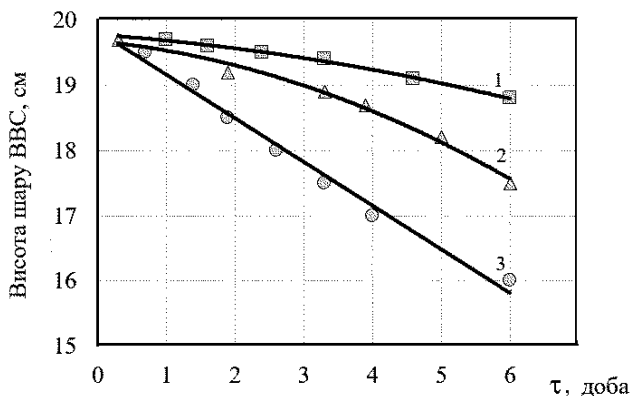


Рис. 11. Зміна з часом висоти шару дисперсної фази ВВС в процесі седиментації при різних концентраціях суспензії  $c_m$ : 1 – 56%; 2 – 69%; 3 – 65%

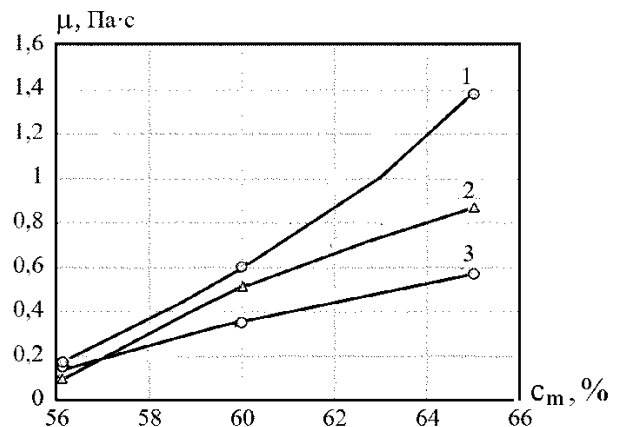


Рис. 12. Залежність динамічної в'язкості від масової концентрації дисперсної фази: 1 – після 30 хв обробки; 2 – після 20 хв обробки; 3 – після 10 хв обробки.



Рис. 13. Аераційно-окислювальна установка роторного типу: 1 – реактор; 2 – РПА; 3 – триходовий кран; 4 – контур рециркуляції; 5 – фільтраційна колона; 6 – розпилювальна головка; 7 – блок управління і контролю.

Зниження жорсткості води є актуальною проблемою як для муніципальних систем водопостачання так і для промислових підприємств та теплових станцій. Проведено дослідження впливу гідродинамічної обробки на зміну рН, концентрацію іонів кальцію і жорсткість води при застосуванні РПА.

Дослідження проводили на дослідно-промисловій установці на базі РПА як кавітаційного реактора (рис. 13), що працює наступним чином. У реактор 1 через патрубок подається вода. Далі вмикають РПА 2, при цьому триходовий кран 3 знаходиться в положенні, в якому рідина циркулює через трубопровід рециркуляції 4 по контуру «реактор – РПА – реактор».

Під час рециркуляції відкривають двоходовий кран, через який за рахунок розрідження, створеного у всмоктуючому трубопроводі, надходить повітря з атмосфери. Таким чином, рідина насичується повітрям. Отримана суміш направляється на обробку в робочу камеру РПА. Після РПА суміш диспергованих в рідині бульбашок повітря (газова емульсія) надходить в трубопровід і

поступає в нижню частину фільтраційної колони 5. Проходячи крізь фільтруючий шар, рідина виходить з колони і подається до збірника готової продукції. У разі недостатнього очищення рідина може рециркулювати по замкненому контуру «реактор – РПА – фільтраційна колона – реактор» необхідну кількість разів, після чого надходить до збірника готової продукції.

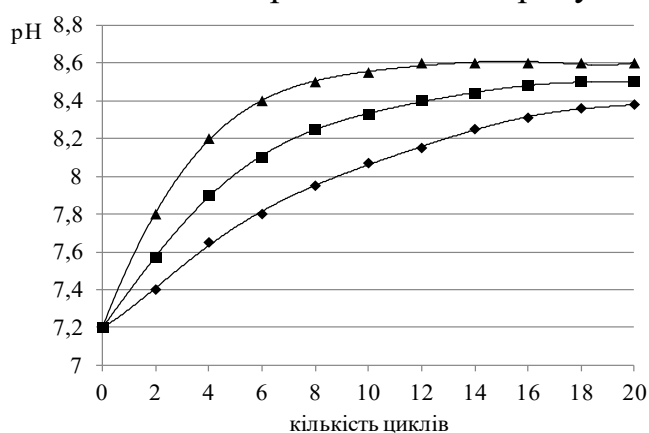


Рис. 14. Залежність зміни рН води від кількості циклів обробки і швидкості зсуву потоку:  $\blacklozenge$  – 20;  $\blacksquare$  – 30;  $\blacktriangle$  – 40 ( $10^3 \text{ s}^{-1}$ ).

Досліджено вплив швидкості зсуву потоку та кількості циклів обробки в РПА на рН води (рис. 14) і концентрацію іонів кальцію (табл. 1).

Встановлено, що при обробці води для зниження її жорсткості збільшення швидкості зсуву потоку рідини при її проходженні через РПА і збільшення кількості циклів обробки підвищують 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/дм<sup>3</sup> протягом 15 циклів обробки при тій же швидкості зсуву потоку.

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. При концентрації розчину аміаку від 0,05 до 0,15 % мас. після 10 циклів обробки рН води перевищує 10. Без додавання розчину аміаку рН води зростає до 8,6.

Таблиця 1. Зміна концентрації іонів кальцію (мг/дм<sup>3</sup>) від кількості циклів обробки і швидкості зсуву потоку рідини  $\gamma$  ( $10^3 \text{ c}^{-1}$ )

Кількість циклів обробки	Концентрація іонів кальцію, мг/дм <sup>3</sup>		
	$\gamma = 20 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$	$\gamma = 30 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$	$\gamma = 40 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$
5	74,0	72,2	67,4
10	70,1	67,2	58,5
15	66,3	62,6	57,1
20	57,9	57,3	57,0

Досліджено вплив концентрації аміаку та кількості циклів обробки на рН води при сталій швидкості зсуву потоку (рис. 15) і вплив концентрації гідроксиду амонію у воді та кількості циклів обробки в РПА на загальну жорсткість води (рис. 16).

Також досліджено вплив концентрації гідроксиду амонію та швидкості зсуву потоку на концентрацію іонів кальцію у воді (табл. 2).

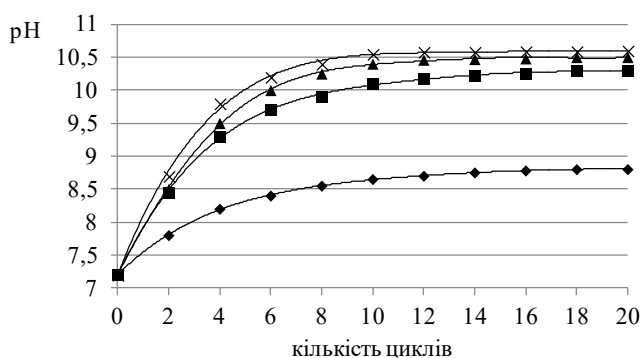


Рис. 15. Залежність зміни рН водного розчину від концентрації аміаку (◆ – 0,00; ■ – 0,05; ▲ – 0,1; × – 0,15 (мас %)) та кількості циклів обробки за швидкості зсуву потоку –  $40 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$ .

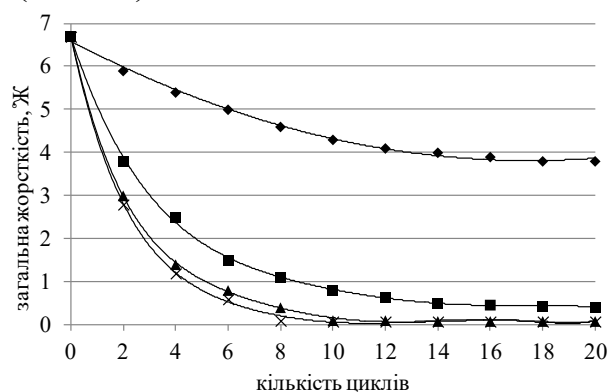


Рис. 16. Залежність зміни загальної жорсткості води від вмісту гідроксиду амонію в розчині (◆ – 0,00; ■ – 0,05; ▲ – 0,1; × – 0,15 (% мас)) та кількості циклів обробки в РПА (швидкість зсуву потоку  $40 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$ ).

Встановлено, що зі збільшенням концентрації гідроксиду амонію в розчині від 0 до 0,15 мг/дм<sup>3</sup> без обробки концентрація іонів кальцію знижується на 64 %, проте при швидкостях зсуву потоку  $(20, 30, 40) \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$  концентрація іонів кальцію знижується на 98,5; 98,3; 99,3 % відповідно. Також встановлено, що зниження жорсткості води до значення менше 0,02 ммоль/дм<sup>3</sup> відбувається при концентрації

гідроксиду амонію  $0,1 \div 0,15$  % мас. після  $9 \div 10$  циклів обробки. Це задовольняє вимогам щодо якості води для водогрійних котлів в той час як без додавання гідроксиду амонію жорсткість води знижується максимум до  $0,68$  ммоль/дм<sup>3</sup>. Визначено, що для забезпечення показника жорсткості води  $0,01$  ммоль/дм<sup>3</sup> оптимальний вміст гідроксиду амонію в розчині повинен становити  $0,1$  % мас. при швидкості зсуву потоку рідини  $40 \cdot 10^3$  с<sup>-1</sup>, що узгоджується з загальноприйнятими вимогами щодо якості води для водогрійних котлів згідно яких жорсткість води не повинна перевищувати  $0,01 \div 0,02$  ммоль/дм<sup>3</sup>.

Таблиця 2. Зміна концентрації іонів кальцію (мг/дм<sup>3</sup>) від концентрації у воді гідроксиду амонію та швидкості зсуву, що діє на потік рідини при обробці в РПА ( $\gamma$ )

Вміст гідроксиду амонію в розчині, мас%	Концентрація іонів кальцію, мг/дм <sup>3</sup>			
	0	$\gamma=20 \cdot 10^3$ с <sup>-1</sup>	$\gamma=30 \cdot 10^3$ с <sup>-1</sup>	$\gamma=40 \cdot 10^3$ с <sup>-1</sup>
0	77,1	70,1	67,2	58,4
0,05	56,5	14,6	11,9	9,08
0,1	50,3	1,17	0,94	0,72
0,15	27,6	1,14	0,92	0,70

Таким чином, застосування РПА дозволяє підвищити продуктивність процесу пом'якшення води та інтенсифікувати його при відносно низьких питомих енергетичних витратах.

У **четвертому** розділі викладено методику розрахунку сопла Вентурі і обґрунтування вибору РПА як кавітаційних реакторів для дегазації рідини.

При застосуванні сопла Вентурі як кавітаційного реактора для дегазації рідини за схемою рециркуляції слід прийняти до уваги, що рідина після проходження через сопло Вентурі через короткий патрубок з діаметром  $d_0$  надходить безпосередньо у вакуумну камеру, тому тиск на виході з сопла Вентурі  $p_k = p_{vac} = \text{const}$ . Тиск у вакуумній камері  $p_{vac}$  потрібно підтримувати на мінімальній величині  $p_{vac} \propto p_{sat}(T_l)$ , що забезпечуються технічними можливостями вакуумного насоса.

Оскільки в процесі кавітаційної дегазації тиск на виході з горловини необхідно скинути до мінімально низьких значень то регулююча діафрагма на виході з сопла не потрібна і коефіцієнт опору діафрагми  $\xi_{df} = 0$ . За рахунок цього, при тому ж перепаді тиску  $p_0 - p_k$ , суттєво зростає масова витрата рідини через сопло  $G_m$  і, відповідно, зменшуються енерговитрати. Таким чином, при застосуванні сопла Вентурі як ГДКР для дегазації рідини залишаються лише два змінних параметри, що контролюють інтенсивність дегазації – тиск на виході з насоса  $p_0$  і діаметр горловини  $d_{thr}$ . Значення інших геометричних параметрів вибираються з інтервалів їх оптимальних значень.

Тиск і швидкість в потоці однофазної в'язкої рідини на виході з горловини сопла Вентурі визначається за формулами отриманими з рівняння Бернуллі:

$$p_{thr} = p_0 - (p_0 - p_{vac}) \cdot \frac{Z_{thr}}{Z_k}, \quad (8)$$

$$v_0 = \sqrt{\frac{2 \cdot (p_0 - p_{vac})}{\rho_l \cdot Z_k}}, \quad (9)$$

$$v_0 = \sqrt{\frac{2 \cdot (p_0 - p_{thr})}{\rho_l \cdot Z_{thr}}}, \quad (10)$$

де:  $Z_{thr} = d_0^4/d_{thr}^4 - 1 + \xi_{con} + \xi_{thr}$ ;  $Z_k = \xi_{con} + \xi_{thr} + \xi_{dif}$ .

Об'ємну витрату рідини через сопло Вентурі  $G_V = v_0 \cdot S_0$  можна визначити з рівняння (9) або (10), однак існує принципова відмінність у застосуванні цих рівнянь. Після того як на виході з горловини виникли умови закипання рідини ( $p_{thr} \leq p_{sat}(T_l)$ ) рівняння (9) вже не можна використовувати, оскільки на ділянці дифузора з постійною витратою тече парорідинний потік бульбашкової структури, в якому по довжині дифузора постійно змінюється густина парорідинного середовища  $\rho_l$  і, відповідно, його швидкість. В цьому випадку для визначення швидкості  $v_0$  і витрати  $G_V$  слід застосувати рівняння (10). Тиск  $p_{thr}$  на виході з горловини визначається з рівняння (8) за умови  $p_{thr} \geq p_{sat}(T_l)$ , коли течія рідини по всій довжині сопла ще однофазна. Значення коефіцієнтів гідравлічних опорів складових сопла  $Z_{thr}$  і  $Z_k$ , є постійними величинами при заданій геометрії сопла.

Виконано розрахунок оптимального діаметра горловини для найбільш ефективної роботи сопла з точки зору врахування двох конкуруючих факторів – досягнення найбільшої інтенсивності колапсу кавітаційних бульбашок при достатньо високій продуктивності (витратах). Встановлено, що для сопла Вентурі з наступними геометричними параметрами: діаметр на вході в сопла  $d_0 = 5$  см; кут розкриття конфузора  $\alpha_{con} = 45^\circ$ ; кут розкриття дифузора  $\alpha_{dif} = 15^\circ$ , довжина сопла  $L_{thr} = d_{thr}$  і тиску в приймальній ємності  $p_{vac} = 0,05$  атм найбільш сильне спадання тиску на виході горловин при течії однофазної рідини до початку кавітаційного режиму відбувається в інтервалі діаметрів горловин  $d_{thr} = 3,0 \div 3,4$  см, причому зі збільшенням діаметра зростає витрата. Також визначено гідравлічні опори складових сопла Вентурі, що наведені в табл. 3.

Таблиця 3. Опори складових сопла Вентурі (діаметрі горловини  $d_{thr} = 3,1$  см)

$\xi_{con}$	$\xi_{thr}$	$\xi_{dif}$	$Z_k$	$Z_{thr}$
0,175	0,270	0,885	1,49	6,29

Для розрахунку РПА як ГДКР визначено характер зміни тиску в рідині  $p_l = f(\tau)$  на вході в II ротор за період одного перекриття отворів РПА.

На рисунку 17 показано, що внаслідок створення кавітаційних ефектів в радіальних канал РПА при періодичному перекритті отворів, тиски в каналах роторів і статора змінюються з частотою перекриття  $f = 3$  кГц від мінімальних від'ємних значень  $p_l = -0,7$  атм до максимальних додатних значень  $p_l = 0,9$  атм. Зазначені на рисунку максимальні додатні значення  $p_l$  забезпечують в каналах ротора I і статора колапс зростаючих бульбашок та їх подальше подрібнення. Наведені на рисунку мінімальні значення  $p_l$  забезпечують на виході з ротора II активацію, зростання і можливу коагуляцію мікробульбашок з радіусами  $R \leq$

0,5мкм, які потім у вигляді кавітаційного кластера бульбашково-рідинної або крапельної структури входять з потоком безпосередньо у вакуумовану камеру, звідки виводяться вакуумним насосом.

Найбільше зниження тиску в каналах РПА слід очікувати на вході в канал II ротора в момент повного перекриття каналів. Це забезпечить інтенсивне зростання розмірів усієї сукупності парогазових бульбашок в рідині, що може призвести до інверсії структури потоку. Якщо на вхід РПА надходить, наприклад, рідина насичена мікроскопічними бульбашками діоксиду вуглецю то на виході з РПА може утворитися газова суміш водяної пари з діоксидом вуглецю, в якій знаходиться велика кількість полідисперсних краплин рідини.

На рис. 18 показано зміну швидкість течії в радіальному напрямі через канали РПА протягом чотирьох періодів перекриття. Дослідження проводили для апарата з постійним числом обертів роторів  $\Omega = 3000$  об/хв ( $\omega = 314$  с<sup>-1</sup>) і шириною міжциліндрового зазору  $\delta = 0,5$  мм.

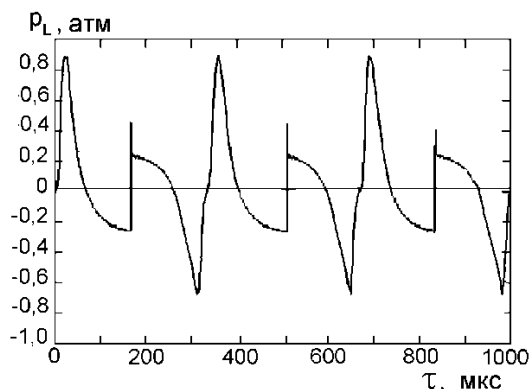


Рис. 17. Зміна з часом тиску в потоці рідини на межі між статором і зовнішнім ротором за 3 періоди перекриття отворів.

Розрахунок за рівняннями моделі РПА ( $\omega = 314$  рад/с;  $p_0 = p_k = 0,2$  атм.)

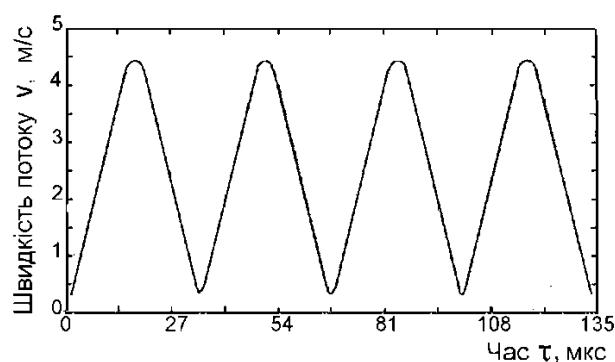


Рис. 18. Зміна з часом швидкості течії через канали РПА протягом чотирьох періодів перекриття отворів роторів і статора.

Виконані дослідження пов'язані з аналізом умов руйнування повітряних бульбашок при високих значеннях швидкості зсуву порядку  $10^4$  с<sup>-1</sup>. (рис. 19, рис. 20).

При проведенні обчислювального експерименту для точної оцінки реальних значень швидкості зсуву були використані технічні характеристики РПА наведені в розділі 3. Дослідження проводилися у припущенні ізотермічного режиму течії рідини через РПА при постійній температурі  $T_l = 20$  °С. Під час експерименту визначався критичний радіус бульбашок  $R_{cr}$ , перевищення якого призводило їх незворотного розтягування і руйнування. Розраховувалися залежності ступеня деформації бульбашки  $a/R = f(\tau)$  для бульбашок різного розміру за інших режимних параметрів. Проведені обчислювальні експерименти 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.

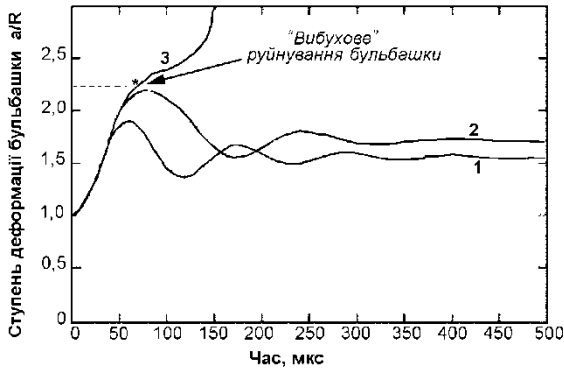


Рис. 19. Зміна в часі ступеня деформації  $a/R$  при деформуванні бульбашок повітря у зсувному потоці води при постійній швидкості зсуву  $G = 47000 \text{ c}^{-1}$  для трьох значень радіуса бульбашки  $R$ : 1 – 1,80 мкм; 2 – 1,83 мкм; 3 – 1,85 мкм.

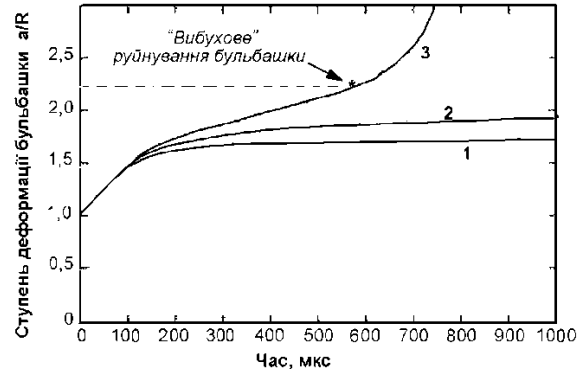


Рис. 20. Зміна в часі ступеня деформації  $a/R$  при деформуванні бульбашок повітря у потоці моторного масла при постійній швидкості зсуву  $G = 47000 \text{ c}^{-1}$  для трьох значень радіуса бульбашки  $R$ : 1 – 1,80 мкм; 2 – 1,83 мкм; 3 – 1,85 мкм.

Наведено методику аналітичного дослідження визначення розподілу за розміром газових зародків у воді. Отримано рівняння для визначення загального числа бульбашок в одиниці об'єму рідини (11) і для визначення об'ємного вмісту газу в рідині (12):

$$N_b(R_{min}, R_{max}) = \frac{N_{\Delta R}(R_1) \cdot R_{min}}{1,47} \left[ \left( \frac{R_{max}}{R_{min}} \right)^{-1,47} - 1 \right]. \quad (11)$$

$$\beta_g(R_{min}, R_{max}) = \frac{4\pi \cdot 10^{12} \cdot R_{min}^4}{3 \cdot 1,53} \left[ \left( \frac{R_{max}}{R_{min}} \right)^{1,53} - 1 \right]. \quad (12)$$

Отримані рівняння для розрахунку об'ємної концентрації газових зародків у воді  $N_b$  та початкового газовмісту води  $\beta_g$  можна застосувати для будь якої рідини. При цьому необхідно мати попередньо визначені достовірні експериментальні дані стосовно густини об'ємної концентрації зародків заданого фракційного складу  $N_{\Delta R}(R)$ . За наявності таких даних можна в аналітичному вигляді одержати залежності  $N_b(R_{min}, R_{max})$  та  $\beta_g(R_{min}, R_{max})$  і застосувати їх в моделях дегазації.

Проведено обчислювальні експерименти з дегазації води зі змінними  $R_0$ ,  $N_b$ , та  $d_1$  при температурі води  $T_l = 20^\circ\text{C}$  з застосуванням сопла Вентурі: кут розкриття конфузора  $\alpha_{con} = 60^\circ$ , кут розкриття дифузора  $\alpha_{dif} = 12^\circ$ , діаметр каналу перед конфузором і на виході з дифузора  $d_0 = 5 \text{ см}$ , довжина горловини сопла  $L_{thr} = 0,2d_0$ . Досліджували сопла з чотирма діаметрами горловини  $d_1$ : 1 см, 2 см, 3 см і 4 см. Довжина каналу від сопла до входу у вакуумну ємність  $L_{tb} = 2D_0 = const$ , тиск у вакуумній камері  $p_{vac} = 0,1 \text{ атм} = const$ , тиск на вході в сопло  $p_0 = 4 \text{ атм}$ .

На рис. 21 а, б показано, що через швидке розширення активованих бульбашок тиск  $p_{lcr}$  швидко наростає по асимптоті до граничного значення  $p_{sat}(T_{l0})$  і тому не встигає знизитись до менших негативних значень ( $p_{lcr} \propto -0,2 \div -0,5 \text{ атм}$ ). За короткий час  $\Delta t \propto 30 \div 40 \text{ мкс}$  тиск в кластері зростає до значення  $p_{cl} = p_{sat}(T_{l0})$  тим швидше, ніж більші за розміром бульбашки (рис. 21 б), що перешкоджає активації бульбашок меншого розміру. Протягом цього періоду відбувається різке

збільшення та плавне зниження швидкості зростання бульбашок (рис. 21 в). Конкуренція між швидкістю скидання зовнішнього тиску  $p_l = f(\tau)$  і швидкістю наростання тиску всередині кластера  $p_{cl} = f(\tau)$  визначає число активованих бульбашок, а отже і ефективність дегазації.

При скиданні тиску до заданого значення  $p_{l\ min}$  бульбашки, незалежно від їхнього початкового радіуса, зростають до однакового розміру. Парові бульбашки зростають тим інтенсивніше, чим нижче значення  $p_{l\ min}$  (рис. 22).

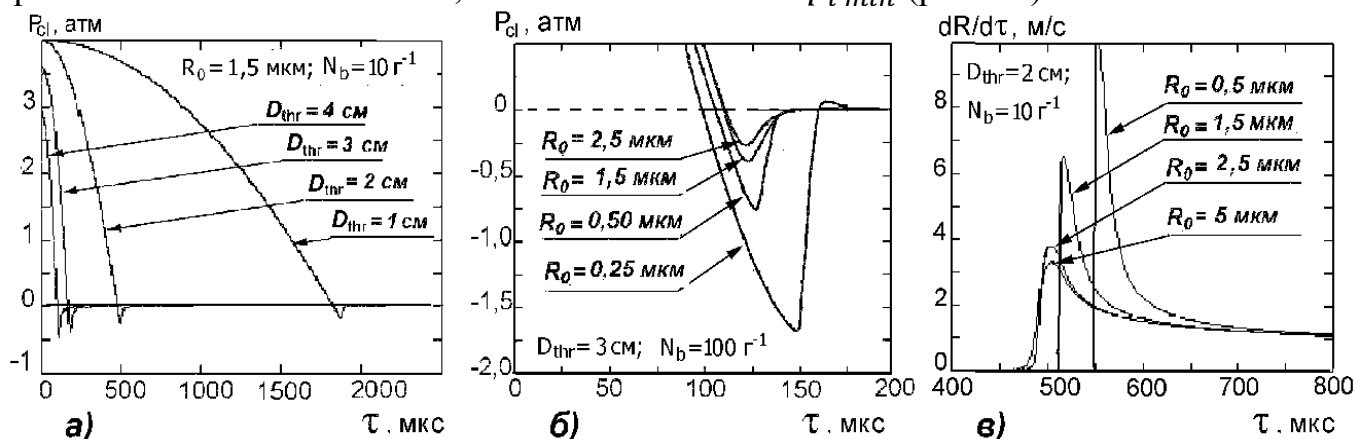


Рис. 21. Характер зміни тиску в рідині всередині кластера  $p_{cl} = f(\tau)$  (а, б) та швидкості зростання радіусу бульбашок  $dR/d\tau = f(\tau)$  (в) на початку розвитку бульбашкового ансамблю в залежності від режимних параметрів:  $d_1$ ,  $R_0$  та  $N_b$ .

Однак, після стабілізації тиску значення  $R_0$  вже не впливають на розвиток кавітаційного кластера. Незалежно від початкового радіуса, бульбашки швидко зростають до однакового розміру. Найбільший вплив на еволюцію кластера створює концентрація бульбашок (рис. 23). При значному впливі величини концентрації бульбашок  $N_{b0}$  на кінетику пароутворення вплив початкового радіуса бульбашок  $R_0$  майже непомітний. З наведених на рисунку даних можна зробити висновок, що при високих концентраціях мікрозародків (незалежно від їх розміру) паровміст може перевищити граничне значення, що, можливо, призведе до інверсії потоку.

На рис. 24 а, б показано, зміну тиску  $p_{cl}$  всередині кластера при швидкій зміні зовнішнього тиску від 0,1 до 1 МПа. При зниженні тиску в рідині від  $p_{l0}$  до  $p_{l\ min} < p_{l\ cr}(R_0)$  тиск  $p_{cl}$  у міжбульбашковому просторі кластера протягом короткого періоду часу ( $\Delta\tau \propto 200$  мкс) зростає від  $p_{cl} = p_{l\ cr}$  до  $p_{cl} = p_{sat}(T_{l0})$  незважаючи на те, що рідина і далі продовжує розтягуватись під впливом зовнішнього тиску  $p_l(\tau)$ . Це призводить до одночасного зростання всіх бульбашок монодисперсного ансамблю. Подальший процес стаціонарного кипіння рідини перебігає протягом тривалого часу при постійному значенні тиску  $p_{cl} = p_{sat}(T_{l0}) = const$ .

Швидкість наближення тиску  $p_{cl}$  до значення  $p_{sat}(T_{l0})$  зростає зі збільшенням розміру бульбашок, а також з підвищенням концентрації  $N_b$ . У реальній рідині це перешкоджає активації бульбашок меншого розміру. Конкуренція між швидкістю скидання зовнішнього тиску  $p_l = f(\tau)$  та швидкістю наростання тиску всередині кластера  $p_{cl} = f(\tau)$  визначає кількість активованих бульбашок.

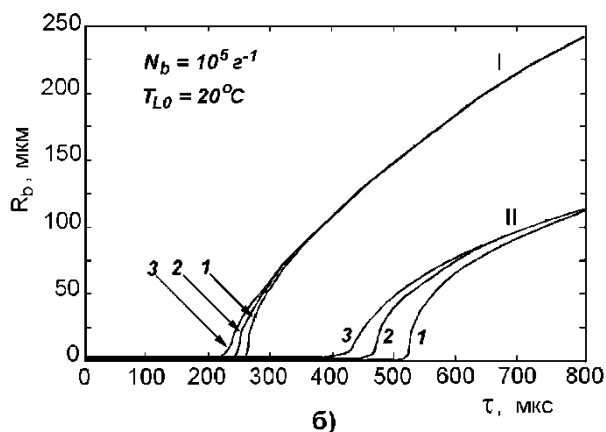


Рис. 22. Зміна з часом радіуса бульбашок монодисперсного бульбашкового кластера при скиданні зовнішнього тиску в залежності від початкового розміру зародків  $R_{b0}$ : 1 – 2,5 мкм; 2 – 1,5 мкм; 3 – 1,0 мкм при двох значеннях мінімального тиску  $p_{l\ min}$ : I – –3 атм; II – –0,5 атм.

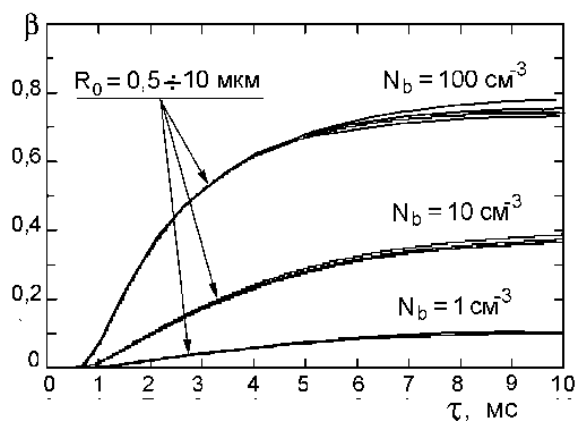


Рис. 23. Залежність поточного паровмісту води в процесі кавітаційного закипання рідини в соплі Вентурі від початкового розміру і концентрації газових зародків.

На базі моделей ДОБ і ДБА досліджено динаміку парогазових бульбашок в РПА. Для опису зміни тиску рідини на вході в II ротор за період одного перекриття отворів РПА використовували залежність  $p_l = f(\tau)$ , одержану з математичної моделі РПА описану в четвертому розділі цієї роботи.

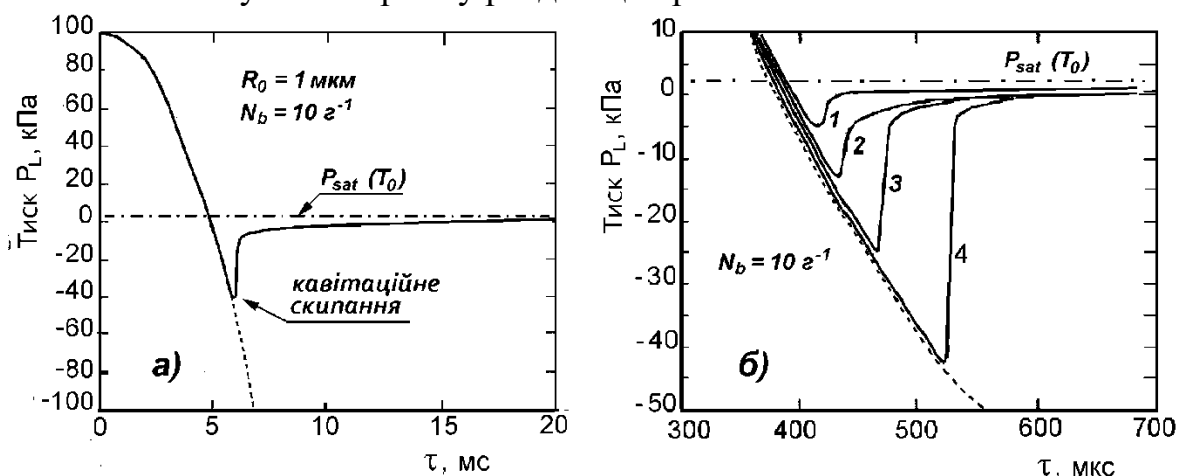


Рис. 24. Зміна з часом тиску  $p_{cl}$  всередині кластера (суцільна лінія) при скиданні тиску у воді  $p_l$  (пунктир) від  $p_{l0} = 0,1$  МПа до  $p_{l\ min} = -1$  МПа при  $N_b = 10$  г<sup>-1</sup>: а – ілюстрація відмінності між тиском кипіння  $p_{sat}(T_{l0})$  та тиском закипання рідини  $p_{l\ cr}(R_0)$ ; б – зміна тиску всередині кластера  $p_{cl}$  на стадії зростання зародків в залежності від їх початкового радіуса  $R_0$ : 1 – 5 мкм; 2 – 2,5 мкм; 3 – 1,5 мкм; 4 – 1 мкм.

На рис. 25 показано зміну величини газовмісту  $\beta = f(R_b)$  в залежності від радіусу зростаючих бульбашок в монодисперсному ансамблі. Розглянуто монодисперсні сукупності бульбашок з сімома значеннями початкових радіусів  $R_{b0}$  – в інтервалі від 0,7 мкм до 10 мкм.

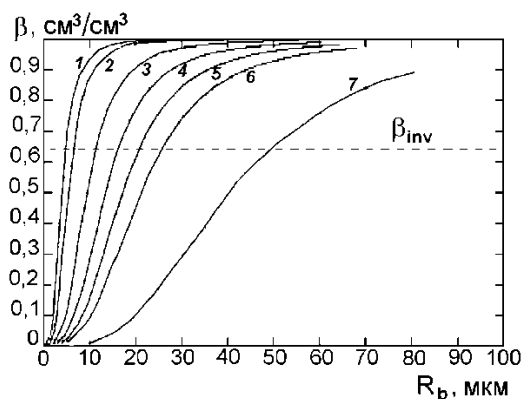


Рис. 25. Залежність величини газовмісту  $\beta = V_g / V_{H_2O}$  монодисперсної сукупності бульбашок діоксиду вуглецю у воді від поточного радіуса бульбашок  $R_b(\tau)$  при різних значеннях початкових радіусів  $R_{b0}$ : 1 – 0,7 мкм; 2 – 1 мкм; 3 – 2 мкм; 4 – 3 мкм; 5 – 4 мкм; 6 – 5,0 мкм; 7 – 10,0 мкм при  $m_{g0} = 70$  мг/л і  $T_l = 25^\circ\text{C}$ .

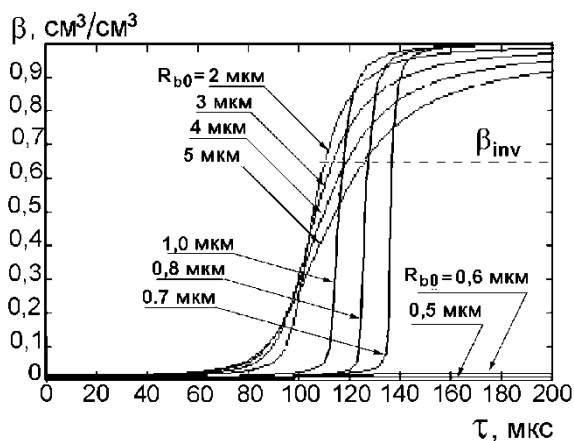


Рис. 26. Зміна з часом величини газовмісту  $\beta = V_g / V_{H_2O}$  монодисперсної сукупності бульбашок діоксиду вуглецю у воді при різних значеннях початкових радіусів  $R_{b0}$  ( $m_{g0} = 70$  мг/л;  $T_l = 25^\circ\text{C}$ ).

Пунктирною лінією показано значення критичного газовмісту  $\beta_{inv} = 0,65$  при якому відбувається інверсія структури потоку – перехід від рідинно-бульбашкової до газокрапельної. З рисунка видно, що для всіх значень  $R_{b0}$  радіуси бульбашок при досягненні критичного газовмісту збільшуються приблизно в п'ять разів, тобто об'єм бульбашкової фази зростає більш ніж на два порядки. Ті ділянки кривих 1–7, що знаходяться вище пунктирної лінії не відповідають реальному стану, бо в цій області  $\beta$  бульбашок вже не існує внаслідок інверсії фаз.

На рис. 26 наведені результати розрахунку залежності величини газовмісту від часу зростання бульбашок ( $\beta = f(\tau)$ ) для дев'яти монодисперсних бульбашкових ансамблів з початковими радіусами  $R_{b0}$  в інтервалі від 0,5 мкм до 5 мкм.

Як видно з рисунку, бульбашки малого розміру ( $R_{b0} \leq 0,6$  мкм) загалі не зростають при даному режимі роботи РПА. Характерним є те, що бульбашки всіх початкових розмірів ( $0,7 \text{ мкм} \leq R_{b0} \leq 5 \text{ мкм}$ ) досягають критичного значення газовмісту  $\beta_{inv}$  практично за однаковий проміжок часу з моменту спадання зовнішнього тиску  $p_{ext}$  в РПА ( $\Delta\tau \approx 115 \div 140$  мкс). Характерним також є те що наростання газовмісту в сукупності бульбашок з відносно великими бульбашками ( $R_{b0} \geq 2$  мкм) відбувається повільно, тоді як для сукупності малих бульбашок ( $R_{b0} \leq 1$  мкм) газовміст зростає майже миттєво. Наведені результати дають певну корисну інформацію для проведення подальших досліджень по цій проблемі.

У **п'ятому** розділі наведені експериментальні дослідження процесу дегазації рідини з застосуванням гідродинамічних кавітаційних реакторів на базі сопла Вентурі та РПА. Для проведення досліджень по кавітаційній дегазації та деарації рідин, зокрема води створено дослідний стенд в якому як кавітаційний реактор застосовували сопла Вентурі різної геометрії та РПА типу ротор-статор-ротор (рис. 27 а, б.).

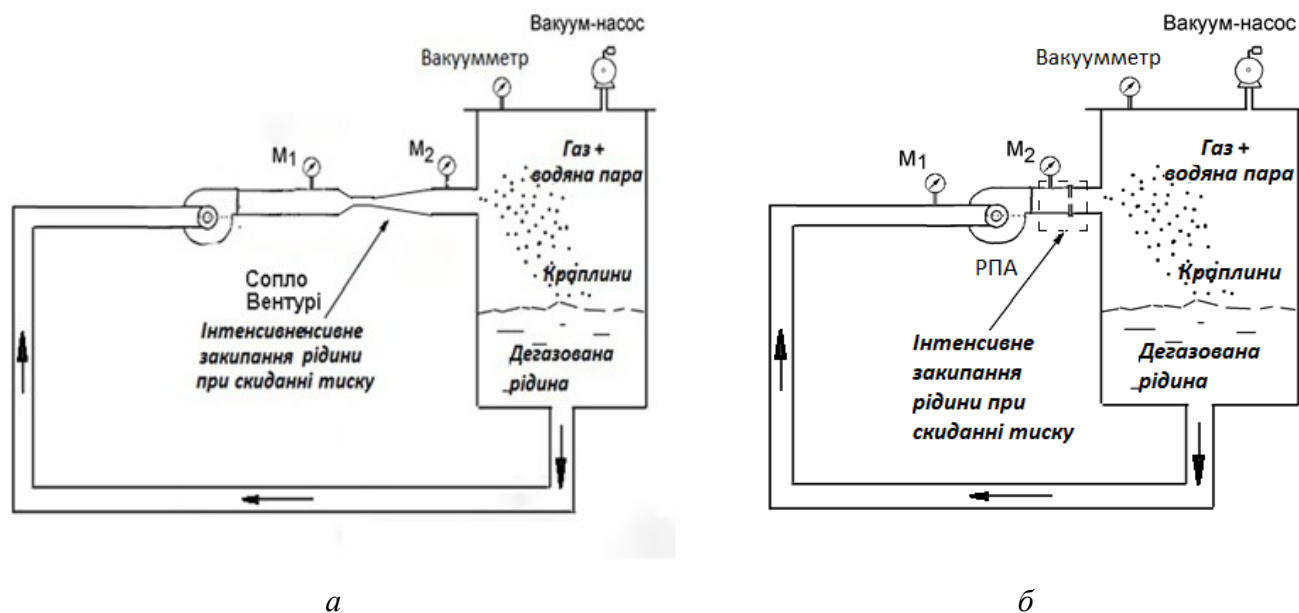


Рис. 27. Схеми стендів для кавітаційної дегазації рідини з кавітаційними реакторами: *а* – на базі сопла Вентурі; *б* – на базі РПА.

Принцип роботи лабораторного стенда на базі сопла Вентурі полягає в тому, що рідина з заданою швидкістю проходить через профільоване сопло з плавним зменшенням площі поперечного перерізу і далі через трубу з постійним діаметром і заданою довжиною надходить у вакуумну камеру, в якій підтримується тиск близький до тиску насиченої пари цієї рідини. В конфузорній ділянці сопла через зменшення тиску утворюється і інтенсивно зростає сукупність парогазових бульбашок.

Дегазація рідини досягається шляхом вилучення мікробульбашок газу внаслідок збільшення їх розмірів в соплі з можливістю реалізації явища інверсії структури потоку. Пара рідини разом з домішками газу відводиться з камери за допомогою вакуумного насоса, а рідина зі знизеним вмістом газу збирається в нижній частині камери і далі під дією відцентрового насоса знову рециркулює через кавітатор.

Принцип роботи лабораторного стенда на базі РПА полягає в тому, що рідина з заданою швидкістю проходить через канали, утворені співвісно розташованими двома роторами і статором між ними (система «ротор-статор-ротор»). Внаслідок швидкого перекриття цих каналів внаслідок обертання роторів відбувається різке зниження тиску рідини в другому роторі після перекриття каналу статором за рахунок сил інерції, що призводить до утворення та інтенсивного зростання сукупності парогазових бульбашок. Далі процес дегазації відбувається як у попередній схемі на базі сопла Вентурі.

Досліджено зміну газовмісту, водневого показника і температури рідини від тривалості її обробки з використанням сопла Вентурі як кавітаційного реактора. Використовуючи теоретичний підхід на базі математичного моделювання наведеному в розділах 2 і 4 визначено оптимальну геометрію сопла Вентурі, що забезпечує високу ефективність кавітаційного впливу при найменших енерговитратах при проходженні рідини через сопло: діаметр поперечного перерізу труби  $D_0 = 40$  мм однаковий на вхідному і на вихідному патрубках, діаметр

горловини сопла  $D_{thr} = 16$  мм, довжина горловини сопла  $L_{thr} = 20$  мм, кут збіжності конфузора  $\beta_{con} = 60^\circ$ , а кут розбіжності дифузора  $\beta_{dif} = 12^\circ$ .

Як робоче середовище використовували модельну рідину – розчин вуглецю в дистильованій воді. Для запуску установки спочатку вмикали вакуумний насос, після встановлення тиску у вакуумній камері 0,011 МПа вмикали відцентровий насос і фіксували час початку обробки рідини. Зразки проб відбирали через 2, 4 і 6 хвилин роботи установки. У відібраних зразків рідини визначали рН і температуру середовища. Експериментальні дослідження проводили у двох режимах (табл. 4). Значення експериментальних даних та концентрації вуглекислого газу з перерахунку одиниць рН у зразках наведено в табл. 5.

Для рН зразків рідини використовували багатофункціональний прилад COnDO EZODO PCT-407 для аналізу параметрів води. Зміну концентрації розчиненої вугільної кислоти визначали користуючись відомими розрахунковими значеннями рН водного розчину вугільної кислоти від її концентрації. Для зручності розрахунків було здійснено апроксимацію і отримано експоненціальну залежність

$$C_{H_2CO_3} = 889673e^{-4,386pH}, \quad (13)$$

де  $C_{H_2CO_3}$  – концентрація вугільної кислоти, моль/л. Коефіцієнт детермінації отриманої залежності становить 0,9999 в діапазоні значень рН=3,7÷6,3.

Таблиця 4. Параметри режимів обробки на стенді з соплом Вентурі

Режим обробки	Контрольовані параметри	Значення
I	Тиск перед трубкою Вентурі, $P_0$	0,15 МПа
	Тиск у вакуумній камері, $P_k$	0,011 МПа
	Масова витрата, $Q$	$6,63 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$
II	Тиск перед трубкою Вентурі, $P_0$	0,30 МПа
	Тиск у вакуумній камері, $P_k$	0,011 МПа
	Масова витрата, $Q$	$9,57 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$

Таблиця 5. Значення експериментальних даних та концентрації вуглекислого газу з перерахунку одиниць рН у зразках

Режим обробки		I				II			
Час обробки, хв		0	2	4	6	0	2	4	6
Фізико-хімічні параметри	рН	4,06	4,31	4,46	4,51	4,06	4,72	4,98	5,12
	Вміст $CO_2$ , мг/л	1100,9	349,5	175,8	139,8	1100,9	53,6	16,5	8,8
	Температура, °С	21,8	22,1	22,3	22,5	21,3	23,9	24,4	25,2

Згідно отриманих даних ефективність дегазації становить 99,2 % для другого режиму обробки, і 87,3 % для першого. Для визначення гідродинамічних параметрів режимів обробки проведено аналітичні розрахунки тиску в трубці Вентурі та його впливу на стан мікробульбашок розчинених газів у рідині шляхом розв'язання рівняння Бернуллі (рис. 28).

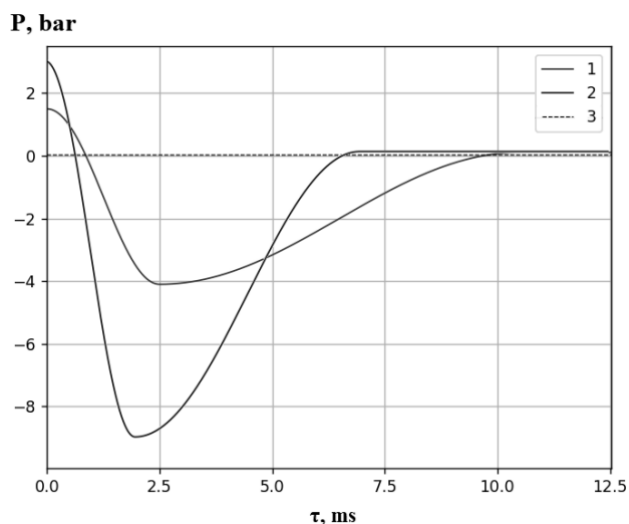


Рис. 28. Залежність зміни тиску в трубі Вентурі від часу: 1 – перший режим обробки; 2 – другий режим обробки; 3 – тиск насичення.

рівняння Релея–Плесета, виведене в розділі 2 цієї роботи. Умови еволюції бульбашки вважали ізотермічними, що допустимо на стадії росту бульбашки. Розрахунок проводили для бульбашки радіусом до 5 мкм, які вважаються стабільними в рідині (рис. 29).

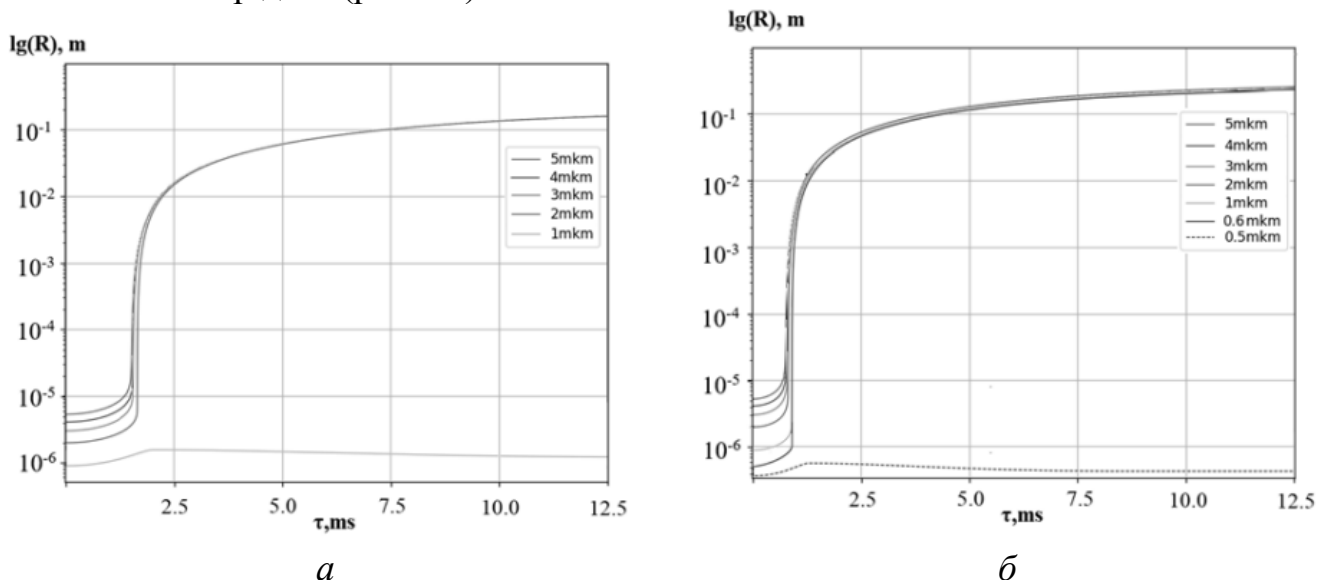


Рис. 29. Залежність зміни радіуса бульбашок з часом від їх початкового розміру: *a* – при режимних параметрах першого режиму обробки; *б* – при режимних параметрах другого режиму обробки.

Результати розрахунку показують, що перший режим обробки дозволяє активувати бульбашки радіусом від 2 мкм, тоді як другий режим – від 0,6 мкм, що забезпечить видалення більшого об'єму газу. Хоча модель ДОБ не враховує умови взаємного впливу при зростанні бульбашок і зміну тиску в кавітаційному кластері, ці результати показують, що швидкість активації вища для бульбашок більшого розміру, тому очевидно, що спочатку буде вилучатись газ з великих бульбашок, а з

З рисунка видно, що перший режим обробки характеризується меншим значенням мінімального тиску і більш плавним його спаданням / зростанням в порівнянні з другим режимом. Так, час скидання тиску становить 2,5 мс і 2 мс, а час його наростання – 8 мс і 5 мс відповідно для першого і другого режимів обробки. Мінімальний тиск при цьому становив  $-4,1$  бар і  $-9,2$  бар у першому та другому випадках відповідно.

Використовуючи отримані залежності зміни тиску в соплі визначено поведінку газової бульбашки використовуючи модель ДОБ, що містить модифіковане

менших – в міру видалення крупніших бульбашок. Граничною умовою для видалення розчинених газів буде найбільший негативний тиск, якого можна досягти для активації бульбашок мінімального розміру.

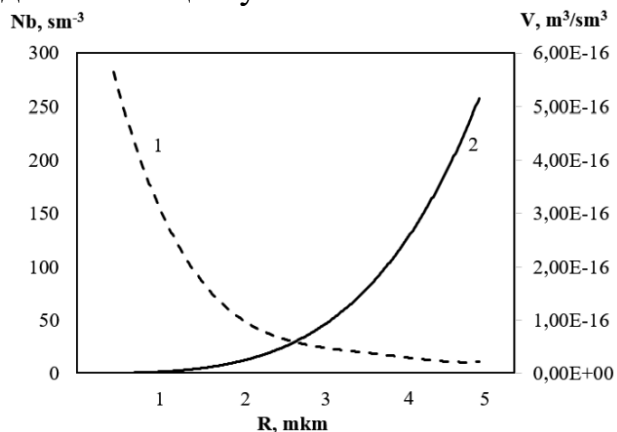


Рис. 30. Розподіл кількості бульбашок газу за розміром (крива 1) та їх об'ємом (крива 2), що містяться у відстояній водопровідній воді.

На основі отриманих результатів встановлено, що в умовах першого режиму обробки можна видалити бульбашки радіусом більше 3,0 мкм, а в умовах другого режиму – від 1,5 мкм, при цьому ефективність дегазації становить 87,3% і 99,2% відповідно (рис. 30).

Також досліджено зміну газовмісту, водневого показника і температури рідини від тривалості її обробки з використанням РПА як кавітаційного реактора. Обробку рідини проводили на РПА типу ротор-статор-ротор з міжциліндровим зазором 500 мкм і частотою обертання роторів 3000 об/хв, який виконував функції

кавітаційного реактора (рис. 27 б). Дослідження проводили на двох рідинах – конденсаті продуктів згоряння природного газу і модельній рідині (розчину діоксиду вуглецю в дистильованій воді).

Обробку вищезгаданих рідин проводили протягом 16 хвилин в режимі рециркуляції 33 л досліджуваної рідини в замкнутому контурі установки при наступних параметрах: тиск парогазорідинної суміші на виході з кавітаційного реактора (на базі РПА) перед розпилюванням у вакуумну ємність – 0,12 МПа, тиск газового середовища у вакуумній ємності – 0,017 МПа, тиск рідини перед входом у кавітаційний реактор – 0,02 МПа. Циркуляція рідини в контурі лабораторного стенду забезпечувалась за рахунок насосного ефекту в РПА зумовленого дією відцентрової сили. Температура води і конденсату перед обробкою становила 15°C. Зразки проб рідини відбирали через кожні 2 хвилини протягом всього часу обробки після чого вимірювали величину водневого показника кожного зразка. Вимірювання рН і визначення концентрації розчиненої вугільної кислоти проводили як в попередньому експерименті з соплом Вентурі. Отримані результати вимірювання рН і обчислення концентрації вугільної кислоти в конденсаті продуктів згоряння природного газу і модельній рідині від тривалості обробки наведені в таблицях 6 і 7.

Відомо, що конденсат продуктів згоряння природного газу утворюється при конденсації утворених під час реакції окислення метану молекул води в основному в середовищі діоксиду вуглецю (9%) і азоту (72%). При оптимальному перебігу процесу горіння в сучасних котлоагрегатах, можна вважати, що утворений конденсат за хімічним складом близький до дистильованої води, насиченої діоксидом вуглецю так як розчинність азоту у воді нижча приблизно в 65÷70 разів. Враховуючи фактичну рівновагу системи «вода – вугільна кислота», при якій концентрація вугільної кислоти значно вища за рівноважну відносно оточуючого середовища можна стверджувати, що діоксид вуглецю в конденсаті міститься як у

розчиненому стані так і у вигляді стабільних мікро- і нанорозмірних бульбашок перебуваючи при цьому в рівновазі з вугільною кислотою.

Таблиця 6. Залежність зміни рН і концентрації вугільної кислоти в модельній рідині від тривалості її обробки.

Тривалість процесу обробки, хв	Після обробки		Через 30 хвилин		Через 5 діб	
	рН	Концентр. вугільної кислоти, мг/л	рН	Концентр. вугільної кислоти, мг/л	рН	Концентр. вугільної кислоти, мг/л
До обробки	4,04	1112,160	4,04	1112,160	4,52	135,474
2	4,82	36,342	4,88	27,933	6,39	0,037
4	4,99	17,242	5,03	14,468	6,64	0,012
6	4,98	18,015	5,12	9,749	6,78	0,007
8	5,08	11,619	5,21	6,570	6,83	0,005
10	5,14	8,930	5,28	4,833	6,90	0,004
12	5,26	5,276	5,40	2,855	6,93	0,003
14	5,37	3,257	5,49	1,924	7,01	0,002
16	5,49	1,924	5,59	1,241	7,05	0,002

Таблиця 7. Залежність зміни рН і концентрації вугільної кислоти в конденсаті продуктів згоряння природного газу від тривалості його обробки.

Тривалість процесу обробки, хв	Після обробки		Через 3 години		Через 1 добу		Через 2 доби	
	рН	Концентр. вугільної кислоти, мг/л	рН	Концентр. вугільної кислоти, мг/л	рН	Концентр. вугільної кислоти, мг/л	рН	Концентр. вугільної кислоти, мг/л
До обробки	4,04	1112,160	4,04	1112,160	4,08	933,199	4,09	893,154
2	4,78	43,312	5,38	3,117	6,01	0,197	6,03	0,180
4	4,94	21,470	5,47	2,100	6,14	0,111	6,19	0,089
6	4,96	19,667	5,54	1,545	6,17	0,097	6,21	0,082
8	5,02	15,116	5,58	1,296	6,18	0,093	6,23	0,075
10	5,09	11,120	5,61	1,137	6,19	0,089	6,23	0,075
12	5,19	7,172	5,67	0,874	6,24	0,071	6,26	0,066
14	5,32	4,055	5,79	0,516	6,31	0,053	6,36	0,042
16	5,40	2,855	5,88	0,348	6,35	0,044	6,39	0,037

При аналізі отриманих даних встановлено, що основна зміна величини рН і вмісту розчиненої вугільної кислоти модельної рідини та конденсату продуктів згоряння природного газу відбувається приблизно протягом перших двох хвилин обробки. Таким чином, нейтралізація конденсату продуктів згоряння природного газу запропонованим способом досягається за рахунок вилучення стабільно існуючих при нормальних умовах бульбашок діоксиду вуглецю внаслідок збільшення їх розмірів.

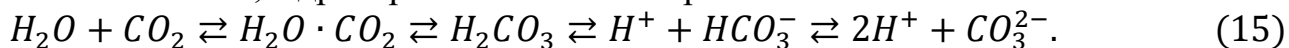
Забезпечивши досягнення критичного газомісту рідини 0,65, при перевищенні якого відбувається безповоротна коагуляція бульбашок і наступна інверсія фаз можна досягнути максимальної ефективності перебігу процесу. При цьому на обробку надходить рідина, насичена мікроскопічними бульбашками діоксиду вуглецю під час якої утворюється суміш водяної пари з діоксидом вуглецю, в якій знаходиться велика кількість полідисперсних краплин рідини. Газова фаза при цьому відводиться з апарата. Також одночасно відбувається розпад вугільної кислоти внаслідок порушення вуглекислотної рівноваги і вилучення інших газів з конденсату.

У *шостому* розділі наведено дослідження по нейтралізації кислого конденсату продуктів згоряння димових газів від вугільної кислоти. Аналіз механізму утворення кислого конденсату показує, що при охолодженні димових газів нижче точки роси в економайзері відбувається конденсація водяної пари в середовищі вуглекислого газу і азоту. Конденсація парів води з димових газів відбувається, як правило, у вертикальних і горизонтальних трубних теплообмінниках з реберними трубами. Димові гази охолоджуються в трубному просторі і при цьому виникає двофазний потік внаслідок конденсації парів води. При цьому конденсат стікаючи плівкою по стінках труб насичується в основному діоксидом вуглецю, що розчиняється в ньому (азот має нижчу розчинність). Також при контакті рідкої і газової фази можуть утворюватися нано- і мікромасштабні бульбашки захопленого рідиною газу. Крім цього, при конденсації парів води на поверхні твердого тіла (стілки труби) в середовищі діоксиду вуглецю відбувається утворення стабільних нанорозмірних бульбашок (так званих *bubstones*) стабілізуючи концентрацію діоксиду вуглецю в конденсаті вище за рівноважну відносно оточуючого середовища.

При конденсації води при глибокому охолодженні димових газів приблизно 1 % розчиненого діоксиду вуглецю вступає в хімічну реакцію з водою утворюючи вугільну кислоту:



Приблизно 5% утвореної вугільної кислоти внаслідок дисоціації утворює у воді іони  $H^+$ ,  $HCO_3^-$ ,  $CO_3^{2-}$ . В результаті у розчині встановлюється рівновага між вугільною кислотою, гідрокарбонат-іонами і карбонат-іонами:



Зі зміною температури і тиску рівновага в розчині може зміщуватись в ліву або в праву сторону зі зростанням, відповідно, концентрації вуглекислого газу або вугільної кислоти.

На основі наведеного вище матеріалу можна стверджувати, що кислий конденсат є насиченим розчином діоксиду вуглецю і вугільної кислоти з мікро- і нанорозмірними бульбашками діоксиду вуглецю, що стабілізують рівновагу в системі.

Розрахунок максимальної величини рН насиченого водного розчину вуглекислоти показує, що при температурі 25 °С і тиску 1 атм рН становить 3,9, а при температурі 55 °С (температура точки роси кислого конденсату) – 4,9. Враховуючи те, що рН досліджуваного кислого конденсату змінювався в межах

4,2÷4,8 можна зробити висновок, що концентрація вугільної кислоти близька до максимально можливої.

При постановці задачі аналітичного дослідження вважали, що кислий конденсат є дистильованою водою з розчиненим в ній вуглекислим газом, що знаходиться в контакті з повітрям під атмосферним тиском  $p_l = p_a = 1$  атм при температурі  $T_{l0} = 20^\circ\text{C}$ . При нормальному тиску повітря парціальний тиск  $\text{CO}_2$  в повітрі  $p_g = 0,0003$  атм. Початковий вміст  $\text{CO}_2$  в конденсаті приймали  $c_{m0} = 70$  мг/л, що узгоджується з результатами вимірювання і даними інших дослідників.

Однак, при даних умовах рівноважна концентрація насичення діоксиду вуглецю у воді становить лише 0,47 мг/л. Таким чином, вміст  $\text{CO}_2$  в конденсаті в багато разів перевищує концентрацію насичення. Оскільки розчин не може стабільно існувати в такому пересиченому стані, вважатимемо, що діоксид вуглецю міститься в воді у вигляді мікроскопічних бульбашок діаметром 0,1÷10 мкм або нанорозмірних бабстоунів з діаметром менше 0,1 мкм так як бульбашки з діаметром більше 10 мкм не можуть тривалий час знаходитись в рідині.

Відомо, що газові зародки з діаметром  $d_b \propto 1\div 5$  мкм можуть дуже довго залишатись в рідині. Зокрема, в роботі Р. Нігматуліна на основі аналізу фізичних процесів утворення зародків дисперсної фази в гетерогенних системах наведені дані про те, що характерний середній розмір газових мікробульбашок у воді дорівнює близько 1 мкм, а їх концентрація становить приблизно  $10^5 \div 10^7$  см<sup>-3</sup>, що підтверджує припущення. Таким чином, задача нейтралізації кислого конденсату зводиться до вилучення максимальної кількості нерозчиненого вуглекислого газу, що перебуває в рідині у вигляді бульбашок.

Розрахунок газовмісту діоксиду вуглецю в конденсаті показав, що в монодисперсній бульбашковій суміші діоксиду вуглецю з водою кількість бульбашок в одиниці об'єму зростає зі зменшенням їх розміру. Так, при зменшенні радіуса бульбашок від 10 мкм до 1 мкм кількість бульбашок  $N_b$  зростає в 200 разів (при  $p_{ext} = 20$  кПа) і в 500 разів (при  $p_{ext} = 100$  кПа). При цьому газовміст  $\text{CO}_2$  в конденсаті змінюється набагато менше – при зменшенні радіусу бульбашок від 10 мкм до 1 мкм газовміст  $V_b$  знизиться приблизно вдвічі (при  $p_{ext} = 100$  кПа) і приблизно в 5 разів (при  $p_{ext} = 20$  кПа). Встановлено, що в бульбашках малого розміру парогозова суміш знаходиться переважно під дією капілярного тиску  $p_\sigma = 2\sigma/R_b$ , який може значно перевищувати зовнішній тиск  $p_{ext}$ . Також слід звернути увагу, що при високому ступені насичення рідини діоксидом вуглецю в бульбашковому стані газовміст становитиме приблизно 1÷2%.

Для дослідження перебігу процесу нейтралізації кислого конденсату розроблено лабораторну установку на базі РПА основні технічні характеристики якого наведені в третьому розділі. Принципова схема установки наведена на рис. 31. Установка складається з ємності двокамерної А1-2, бачка трьохсекційного БВ, роторно-пульсаційного апарата РПА і вакуумного насоса ВВН, що з'єднані між собою системою трубопроводів та змонтовані на заземленій рамі, а також пульта керування.



Зміну температури конденсату продуктів згоряння природного газу під час його обробки на лабораторній установці для нейтралізації кислого конденсату зображено на рис. 32.

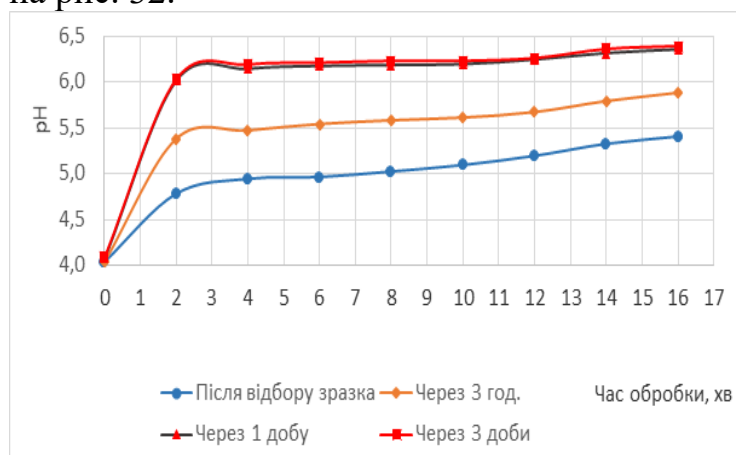


Рис. 32. Зміна величини водневого показника конденсату продуктів згоряння природного газу після його обробки на лабораторній установці для нейтралізації кислого конденсату

Отримані результати показують, що основна зміна величини рН відбувається приблизно протягом 2 хвилин обробки. Подальша обробка рідини також призводить до підвищення величини рН, проте швидкість його зростання значно нижча, хоча й стабільна протягом всього часу обробки. Це дозволяє припустити, що протягом перших двох хвилин обробки відбувається вилучення основної кількості вуглекислоти, розчиненої в конденсаті.

Також видно, що оброблена рідина перебуває в нестабільному стані, про що свідчить подальше зростання величини рН рідини. Після витримки обробленої рідини можна отримати значення величини рН не нижче 6,0 при тривалості рециркуляції (часу обробки)  $1,5 \div 2$  хвилини. Підвищення температури рідини внаслідок дисипативного виділення теплоти під час обробки становило приблизно  $1,8^\circ\text{C}/\text{хв}$ , що при тривалості одного робочого циклу  $1,5 \div 2$  хвилини суттєво на перебіг процесу не впливає. Однак, підвищення температури повинно позитивно впливати на швидкість вилучення діоксиду вуглецю з рідини, тому конденсат на обробку бажано подавати одразу після економайзера системи глибокої утилізації теплоти димових газів від газового котла.

У *сьомому* розділі розглянуто перспективи реалізації досліджуваних процесів для промислового застосування.

На базі способу кавітаційної дегазації рідини в рамках виконання науково-технічної роботи «Розроблення двокамерної установки для безреагентної нейтралізації кислих конденсатів продуктів згоряння газу в опалювальних та промислових котельнях» (№ держ. реєстр. 0115U005525) розроблене інноваційне обладнання для безреагентної нейтралізації кислого конденсату продуктів згоряння природного газу (далі – нейтралізатор безреагентний). Під час проведення випробувань обладнання встановлено, його продуктивність становить 450 л/ год, що може забезпечити нейтралізацію кислого конденсату від котлів сумарною тепловою потужністю як мінімум 3,2 МВт. Також досліджено основні фізико-хімічні показники трьох зразків конденсату продуктів згоряння природного газу: необробленого, обробленого протягом 5 хв і 10 хв на дослідному зразку установки (протокол № Е169/16 дослідження об'єктів довкілля від 16 грудня 2016 р. екологічної лабораторії «ЕКОМЕДСЕРВІС», що міститься в додатках дисертаційної роботи).

Техніко-економічна ефективність запропонованого способу безреагентної нейтралізації конденсату полягає в наступному. Запропонований спосіб ґрунтується на використанні фізичних впливів на оброблюване середовище, зокрема кавітаційної дегазації, без використання хімічних реагентів і реалізується у високоефективному малогабаритному апараті з низькими питомими енерговитратами. На основі порівняльної характеристики різних типів обладнання для нейтралізації кислого конденсату встановлено, що загальні витрати на 1 тону продукції можуть бути в 2-3 рази менші порівняно з використовуваним обладнанням.

Попередня оцінка загальної потреби в установках, в яких буде реалізований запропонований спосіб нейтралізації кислого конденсату в Україні становить щонайменше 10 000 шт. (з розрахунку встановлення однієї установки на три котла при загальній кількості 30 тис. шт.), а орієнтовний термін окупності – до 18 місяців (1-1,5 опалювальних сезони). Потенційним ринком збуту на початковому етапі є підприємства комунальної енергетики України. В подальшому перспективними ринками збуту є країни СНД і ЄС.

Соціально-економічний ефект від впровадження установок нейтралізації кислого конденсату полягає в поліпшенні стану довкілля шляхом скорочення шкідливих викидів (хімічно забрудненого нейтралізованого кислого конденсату і відходів установок пом'якшення води), раціональному використанні водних ресурсів шляхом економії близько 8,5 млн. м<sup>3</sup> водопровідної води.

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 600 тис. грн. протягом року.

*Рекомендації щодо промислового використання обладнання для отримання універсального водовугільного палива.* На базі проведених експериментальних досліджень визначено режимні параметри роботи обладнання для приготування універсального водовугільного палива (УВВП). Встановлено, що для отримання суспензії з розміром дисперсних частинок до 3 мкм вугілля попередньо необхідно диспергувати в дезінтеграторі до розміру частинок 500 мкм. Після чого отриманий помел вугілля в змішувати з водою у співвідношенні 70 : 30 та обробляти в РПА при швидкості обертання ротора 50 с<sup>-1</sup> протягом 8÷10 циклів. При цьому зазор між статором і роторами повинен становити 500 мкм. 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. Використання модифікованого пульсаційного диспергатора як альтернативи РПА для готування водовугільного палива показало можливість готування водовугільного палива з потрібним фракційним складом, що відповідає вимогам використання для ТЕС, котельних і ТЕЦ, проте запропонований спосіб знаходиться на початковому етапі розробки.

*Рекомендації щодо промислового використання обладнання для зниження жорсткості води.* Проведені дослідження показали, що для забезпечення показника жорсткості води 0,01 ммоль/л оптимальний вміст гідроксиду амонію в розчині повинен становити 0,1 % мас. при швидкості зсуву потоку рідини 40·10<sup>3</sup> с<sup>-1</sup>, що узгоджується з загальноприйнятими вимогами щодо якості води для водогрійних

котлів згідно яких жорсткість води не повинна перевищувати  $0,01 \div 0,02$  ммоль/л. Встановлено, що обробка води в РПА використовуючи кавітаційні механізми принципу ДІВЕ може знайти застосування при реалізації низки хімічних методів пом'якшення води для зменшення витрати реагентів та підвищення ступеня її очищення.

### **ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ**

У дисертації проведено аналітичне узагальнення та отримано нове вирішення наукової проблеми, що виражається в обґрунтуванні нового підходу до застосування кавітаційних механізмів у дисперсних багатофазних рідинних течіях в процесах диспергування, дегазації рідин, створення альтернативних видів палива тощо. В результаті виконання дисертаційної роботи розроблено ефективний та надійний інструмент для дослідження, що забезпечує можливість отримання нової корисної інформації щодо механізмів та процесів, які визначають виникнення потужних динамічних ефектів, властивих цим явищам, та дозволяє суттєво розширити наші уявлення про природу цих явищ. Створені математичні моделі використовуються щодо динамічних та енергетичних показників застосованих в роботі стаціонарних та ротаційних гідродинамічних кавітаційних реакторів, а також можуть застосовуватися для аналізу технологічних процесів з метою контролю та оптимального управління. На основі цих моделей створено науково обґрунтовані методики розрахунку роботи апаратів та технологічних ліній, що базуються на концепції дискретно-імпульсного введення енергії.

#### ***Основні наукові та практичні результати дослідження***

1. Проведено огляд літератури і проаналізовано сучасний стан питань за темою планованого дисертаційного дослідження. Встановлено, що гідродинамічна кавітація може розглядатися як перспективна і більш дешева альтернатива акустичній кавітації для промислового застосування в різних галузях промисловості, зокрема в технологічних операціях дегазації рідин, водоочищення, створення альтернативних видів палива тощо. Однак, труднощі проведення експериментальних досліджень в часовому і просторовому нано-масштабах та відсутність узагальнюючих математичних моделей з максимальним урахуванням визначальних фізичних факторів гідродинамічної кавітації стримують створення і впровадження в промисловість інноваційних кавітаційних технологій через проблеми вибору та обґрунтування раціональної конструкції кавітаційного обладнання і оптимальних режимів його роботи. Таким чином, подальші дослідження в цьому напрямку є актуальними. Враховуючи низку невирішених питань стосовно механізмів гідродинамічної кавітації, зокрема в процесах дегазації рідини і водоочищення визначено мету дисертаційної роботи, для досягнення якої поставлені відповідні завдання.

2. Обґрунтовано переваги принципу ДІВЕ як ефективного і перспективного способу інтенсифікації гідромеханічних та масообмінних процесів у дисперсних рідинних середовищах, що забезпечує суттєве зниження непродуктивних витрат енергії. Сформульовано критерії ефективності механізмів ДІВЕ, найважливішим з яких є максимально швидка зміна зовнішнього тиску в газорідинній системі бульбашкової структури, з чого логічно випливає поняття кавітації. Показано, що

кавітацію слід розглядати як найбільш потужний механізм ДІВЕ з точки зору динамічної та термічної дії на оточуючі макро- та мікрооб'єкти.

3. На основі створених в ІТТФ НАН України, в рамках розвитку теоретичних засад ДІВЕ математичних моделей динаміки одиничної бульбашки і динаміки бульбашкового ансамблю розроблено модифіковану математичну модель, що описує динаміку парогазових бульбашок у стисливій рідині з урахуванням ефектів сферичного гідравлічного удару.

4. В межах дослідження кінетики кавітаційного закипання рідини розглянуто умову рівноваги бульбашок в системі «парогазові бульбашки – рідина» в процесі кавітаційного закипання рідини в ізотермічному режимі. Виведено формули для розрахунку критичних значень тиску в рідині і радіуса бульбашки, які відповідають початку активації бульбашок та їх незворотного зростання.

5. Створено математичну модель деформування та руйнування рідких та газових дисперсій в зсувних течіях, яка вперше дозволяє описати дані процеси в широкому інтервалі зміни режимних параметрів. Вперше встановлено критерій незворотної деформації та наступного руйнування рідинних та газових дисперсій,  $(a/R)_{cr} = 2,2$  який можна розглядати як фізичну константу незалежну ні від теплофізичних властивості рідини і газу, ні від числа Рейнольдса, ні від напруження зсуву в зазорі. Проведені обчислювальні експерименти підтвердили, що для інерційного і стоксівського режимів встановлений критерій руйнування залишається справедливим.

6. Створено математичну модель роторно-пульсаційного апарата циліндричного типу системи ротор–статор–ротор, що описує нестационарний рух рідини в апараті при періодичному перекритті каналів між роторами і статором з точним урахуванням питомих величин гідравлічних опорів в залежності від числа Рейнольдса. Також створено математичну модель для розрахунку сопла Вентурі як кавітаційного реактора. Отримані моделі можуть бути використані як окремі субмоделі в загальній моделі динаміки парогазових бульбашок для опису розподілу лінійних швидкостей потоку і тисків по довжині каналів роторно-пульсаційного апарата або тиску і швидкості в потоці рідини по довжині сопла.

7. Проведено дослідження впливу гідродинамічної обробки в роторно-пульсаційному апараті на фракційний склад водовугільної суспензії, визначено режимні параметри роботи обладнання для приготування універсального водовугільного палива. Встановлено, що для отримання водовугільної суспензії з розміром дисперсних частинок до 3 мкм вугілля необхідно попередньо диспергувати в дезінтеграторі до розміру частинок 500 мкм, далі отриманий помел вугілля рекомендовано змішувати з водою в співвідношенні 70 : 30 і обробляти в роторно-пульсаційному апараті з міжциліндровим зазором між ротором і статором 500 мкм при швидкості обертання ротора  $50 \text{ с}^{-1}$  протягом  $8 \div 10$  циклів.

8. Проведено дослідження впливу гідродинамічної обробки з використанням модифікованого пульсаційного диспергатора як альтернативи роторно-пульсаційному апарату для готування водовугільного палива. Цей тип гідродинамічного кавітаційного реактора більш стійкий до абразивному впливу з боку жорстких водовугільних суспензій ніж роторно-пульсаційний апарат 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. Попри те, що запропонований спосіб знаходиться на початковому етапі розробки, дослідження показали його перспективність для забезпечення седиментаційної стійкості водовугільної суспензії протягом 5-6 діб без застосування хімічних домішок.

9. Проведено дослідження впливу гідродинамічної обробки в роторно-пульсаційному апараті на зміну жорсткості води. Визначено, що для забезпечення необхідного показника жорсткості води  $0,01$  ммоль/дм<sup>3</sup> необхідно проводити обробку при швидкості зсуву потоку рідини  $40 \cdot 10^3$  с<sup>-1</sup> протягом 9÷10 циклів обробки при концентрації гідроксиду амонію в розчині 0,1 % мас.

10. Розроблено методику розрахунку сопла Вентурі як гідродинамічного кавітаційного реактора для дегазації рідини. Встановлено, що для ефективного перебігу процесу дегазації потрібно забезпечити гранично високу швидкість зниження тиску рідини 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.

11. Розроблено алгоритм розрахунку об'ємної концентрації газових зародків у воді та початкового газовмісту, який може бути застосований для будь якої рідини, якщо при наявності достовірних експериментальних даних стосовно густини об'ємної концентрації зародків заданого фракційного складу. Проведено розрахунки концентрації бульбашок діоксиду вуглецю і його газовмісту в монодисперсній бульбашковій суміші «вода – діоксид вуглецю» для поточних значень радіуса бульбашок залежно від зовнішнього тиску і масової концентрації газу.

12. Проведено експериментальні дослідження зміни газовмісту модельної рідини (розчину діоксиду вуглецю в дистильованій воді) з застосуванням сопла Вентурі як гідродинамічного кавітаційного реактора. Встановлено, що при тиску на вході в сопло  $p_0 = 0,30$  МПа, тиску на виході сопла  $p_k = 0,011$  МПа ефективність дегазації становила 99,2 % після обробки протягом 6 хв і при цьому розрахований мінімальний тиск в горловині сопла становив  $-9,2$  бар.

13. Розроблено лабораторну установку для нейтралізації кислого конденсату димових газів, проведено експериментальні дослідження зміни водневого показника кислого конденсату і модельної рідини. Визначено оптимальні режими для проведення обробки. Встановлено, що для отримання стабільного рН не нижче 6,0 потрібно забезпечити тривалість рециркуляції (час обробки)  $1,5 \div 2$  хв.

14. На базі лабораторної установки для нейтралізації кислого конденсату розроблений експериментальний дослідний зразок установки – нейтралізатор безреагентний, проведені його попередні випробування і визначено оптимальну продуктивність, що становить 450 л/год. і може забезпечити нейтралізацію кислого конденсату від котлів сумарною тепловою потужністю щонайменше 3,2 МВт при в 2-3 рази нижчих витратах порівняно з існуючими способами.

15. Застосування розробленого обладнання дозволить поліпшити стан довкілля шляхом скорочення шкідливих викидів (хімічно забрудненого нейтралізованого кислого конденсату і відходів установок пом'якшення води), раціональному використанні водних ресурсів шляхом економії близько 8,5 млн. м<sup>3</sup> природної води. 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 600 тис. грн протягом року.

### УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

$a$  – головна піввісь еліпсоїда;  $d$  – діаметр бульбашки;  $e$  – ексцентриситет еліпсоїда;  $G_m$  – масова витрата;  $G_{sh}$  – швидкість зсуву;  $L$  – довжина;  $m$  – маса;  $N_b$  – кількість бульбашок в одиниці маси газорідинної суміші;  $p$  – тиск;  $R$  – радіус;  $\tilde{R}$  – газова стала;  $r$  – радіальна координата;  $S$  – площа;  $T$  – температура;  $V$  – об'єм;  $v, u$  – швидкість;  $\beta$  – газовміст рідини;  $\beta_{ad}$  – коефіцієнт адіабатичної стисливості рідини;  $\mu$  – динамічна в'язкість;  $\rho$  – густина;  $\sigma$  – поверхневий натяг;  $\tau$  – час;  $\omega$  – кутова швидкість;  $\xi$  – коефіцієнт гідравлічного опору.

*Індекси:* 0 – початкове значення;  $a$  – атмосферний;  $ac$  – акустичний;  $b$  – бульбашка;  $con$  – конфузор;  $dif$  – дифузор;  $g$  – газ;  $k$  – кінцеве значення;  $kin$  – кінетичний;  $l$  – рідина;  $m$  – масовий;  $max$  – максимальне значення;  $min$  – мінімальне значення;  $pot$  – потенціальний;  $r$  – радіальний;  $sat$  – насичений;  $st$  – стандартний;  $thr$  – горловина;  $V$  – об'ємний;  $v$  – пара.

*Скорочення:* А1-2 – ємність двокамерна; БВ – бачок водяний; ВВН – водо-кільцевий вакуумний насос; ВВС – водовугільна суспензія; ГД – гідродинамічний; ГДКР – гідродинамічний кавітаційний реактор; ДОБ – динаміка одиначної бульбашки; ДБА – динаміка бульбашкового ансамблю; ДІВЕ – дискретно-імпульсне введення енергії; КЕ – клапан електромагнітний; РПА – роторно-пульсаційний апарат; ТМО – тепломасообмін; УЗ – ультразвук.

### ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

*Наукові праці, що входять до наукометричних баз Scopus та Web of Science:*

1. Obodovych Oleksandr M., Tselen Bogdan Ya., Sydorenko Vitalii V., Ivanytskyi Georgy K., Radchenko Natalia L. Application of the method of discrete-pulse energy input for water degassing in municipal and industrial boilers. *Acta Periodica Technologica*. 2022. Issue 53. P. 123–130. Quartile: Q3. [іноземне видання; Міжнародні наукометричні бази: Scopus]. (Вклад здобувача – постановка задачі, розробка методики дослідження, участь в обробці результатів).

2. Obodovych O., Sablii L., Sydorenko V., & Tselen B. Improving the efficiency of calcium hydrocarbonate removal and reducing water hardness through discrete pulse energy input. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2023. Vol. 4. No. 6 (124). P. 28–34. Quartile: Q4. [Міжнародні наукометричні бази: Scopus]. (Вклад здобувача – участь в постановці задачі, розробці методики дослідження та обробці результатів).

3. Nedbailo Anna Ye., Ivanitsky Georgy K., Tselen Bogdan Ya, Obodovych Oleksandr M., Radchenko Natalia L. Evaluation of the efficiency of liquid degassing technology

based on the principle of hydrodynamic cavitation. *Acta Periodica Technologica*. 2023. Issue 54. P. 237–244. Quartile: Q4. [іноземне видання; Міжнародні наукометричні бази: Scopus]. (Вклад здобувача – постановка задачі, розробка методики дослідження, участь в обробці результатів).

4. Bogdan Tselen, Georgiy Ivanitsky, Oleksandr Obodovych, Nataliya Radchenko, Anna Nedbailo, Liubov Gozhenko. Application Method of Hydrodynamic Cavitation in the Scope of Municipal Energy to Reduce the Use of Water Resources. *Rocznik Ochrona Środowiska*. 2023. Volume 25. P. 215–221. Quartile: Q3. [іноземне видання; Міжнародні наукометричні бази: Scopus, ISI Web of Science]. (Вклад здобувача – постановка задачі, участь в розробці методики дослідження та обробці результатів).

5. Obodovych O., Tselen B., Stepanova O., Nedbailo A., & Bulii Y. Technology and Equipment for Obtaining of Universal Hydrocarbon Fuel. *Energy Technologies & Resource Saving*. 2024. Vol. 78, No. 1. P. 24–33. Quartile: Q4. [Міжнародні наукометричні бази: Scopus]. (Вклад здобувача – участь в постановці задачі, розробці методики дослідження та обробці результатів).

6. Hozhenko Liubov P., Ivanitsky Georgiy K., Tselen Bogdan Ya., Radchenko Natalia L., Nedbailo Anna Ye. The application of hydrodynamic cavitation methods to increase the efficiency of the process of extracting biologically active substances from the walnut septums. *Acta Periodica Technologica*. 2024. Issue 55, P. 215–223. Quartile: Q4. [іноземне видання; Міжнародні наукометричні бази: Scopus]. (Вклад здобувача – участь в постановці задачі, розробці методики дослідження, обробці результатів).

7. Obodovych O. M., Tselen B. Ya., Nedbailo A. Ye., Ivanitsky G. K., Radchenko N. L., Hozhenko L. P. Comprehensive technology for utilization of acid condensate from flue gas after boiler units. *Energy Technologies & Resource Saving*. 2024. Vol. 81, No. 4. P. 124–133. Quartile: Q4. [Міжнародні наукометричні бази: Scopus]. (Вклад здобувача – участь в постановці задачі, розробці методики дослідження та обробці результатів).

#### **Статті у фахових виданнях України:**

8. Щепкин В.И., Целень Б.Я., Радченко Н.Л. Исследование влияния кавитации на качество эмульсии при получении топливных композиций. *Наукові праці ОНАХТ*. 2014. Випуск 45, Т.3. С. 196–199. [Фахове видання]. (Вклад здобувача – участь в постановці задачі, розробці методики дослідження та обробці результатів).

9. Целень Б.Я., Яроцький С.М. Нейтралізація кислих водних розчинів методом дискретно-імпульсного введення енергії. *Наукові праці ОНАХТ*. 2014. Випуск 45, Т.3. С. 34–39. [Фахове видання]. (Вклад здобувача – постановка задачі, розробка методики дослідження, участь в обробці результатів).

10. Долинский А.А., Шурчкова Ю.А., Целень Б.Я. Технология и оборудование для нейтрализации кислых стоков. *Промышленная теплотехника*. 2014. Том 36, № 5. С. 98–105. [Фахове видання]. (Вклад здобувача – участь в постановці задачі, розробці методики дослідження та обробці результатів).

11. Яроцький С.М., Целень Б.Я. Перспектива використання способу дискретно-імпульсного введення енергії для нейтралізації кислих водних розчинів. *Промышленная теплотехника*. 2015. Том 37, № 4. С. 23–30. [Фахове видання].

*(Вклад здобувача – постановка задачі, розробка методики дослідження, участь в обробці результатів).*

12. Целень Б.Я. Спосіб безреагентної нейтралізації кислого конденсату продуктів згоряння природного газу. Наукові праці ОНАХТ. 2015. Випуск 47, Т.2. С. 109–111. *[Фахове видання].*

13. Долінський А.А., Целень Б.Я., Гартвіг А.П., Коник А.В., Радченко Н.Л., Щепкін В.І. Утворення кислого конденсату при глибокій утилізації теплоти продуктів згоряння природного газу і обладнання для його нейтралізації. Наукові праці ОНАХТ. 2016. Т.80, Вип. 1. С. 4 – 8. *[Фахове видання]. (Вклад здобувача – розробка методики дослідження, участь в постановці задачі та обробці результатів).*

14. Долінський А.А., Целень Б.Я., Іваницький Г.К., Коник А.В., Радченко Н.Л., Гартвіг А.П. Застосування способу дискретно-імпульсного введення енергії для нейтралізації конденсату продуктів згоряння природного газу. Наукові праці ОНАХТ. 2017. Т.81, Вип. 1. С. 9–14. *[Фахове видання]. (Вклад здобувача – розробка методики дослідження, участь в постановці задачі та обробці результатів).*

15. Долінський А.А., Коник А.В., Радченко Н.Л., Целень Б.Я., Гоженко Л.П. Перспективність та напрямки розвитку апаратів, принцип роботи яких ґрунтується на механізмах дискретно-імпульсного введення енергії. Промышленная теплотехника. 2017. Том 39, № 5. С. 7–11. *[Фахове видання]. (Вклад здобувача – участь в розробленні обладнання, виконанні експериментальних досліджень, підготовці матеріалів для публікації).*

16. Іваницький Г.К., Целень Б.Я., Недбайло А.Е., Коник А.В. Исследование дегазации жидкости в кавитационных течениях. Проблемы моделирования. Наукові праці ОНАХТ. 2019. Т.83, Вип. 1. С. 129–134. *[Фахове видання]. (Вклад здобувача – участь в постановці задачі, виконанні чисельного експерименту, обробці результатів).*

17. Ivanitsky G.K., Tselen V.Ya., Nedbaylo A.E., Konyk A.V. Modeling the kinetics of cavitation boiling up of liquid. Фізика аеродисперсних систем. 2019. № 57. С. 136–146. *[Фахове видання]. (Вклад здобувача – участь в постановці задачі, виконанні чисельного експерименту, обробці результатів).*

18. Ivanitsky G.K., Tselen V.Ya., Nedbaylo, A.E., Gozhenko, L.P. The ways of producing an unified mathematical model for the cavitating flow in hydrodynamic cavitation reactors. Теплофізика та теплоенергетика. 2020. Том 42, № 2. С. 31–38. *[Фахове видання]. (Вклад здобувача – участь в постановці задачі, виконанні чисельного експерименту, обробці результатів).*

19. Іваницький Г.К., Целень Б.Я., Радченко Н.Л., Гоженко Л.П. Аналітичне дослідження механізму деформування та руйнування крапель в зсувних течіях. Теплофізика та теплоенергетика. 2021. Том 43, № 1. С. 30–37. *[Фахове видання]. (Вклад здобувача – участь в постановці задачі, виконанні чисельного експерименту, обробці результатів).*

20. Ivanitsky G.K., Tselen V.Ya., Radchenko N.L., Gozhenko L.P. Modeling of water hammer effect during the single cavitating bubble oscillation. Фізика аеродисперсних

систем. 2022. № 60. С. 176–186. [Фахове видання]. (Вклад здобувача – участь в постановці задачі, виконанні чисельного експерименту, обробці результатів).

21. Іваницький Г., Целень Б., Радченко Н. Використання гідродинамічної кавітації для підвищення ефективності процесу кристалізації лактози в молочній сироватці. Scientific Works. 2022. 86(1). С. 11–16. [Фахове видання]. (Вклад здобувача – участь в постановці задачі, розробці методики дослідження, виконанні експериментальних досліджень, підготовці матеріалів для публікації).

22. Nedbailo A., Ivanytsky G., Tselen B. Y., Radchenko N., Gozhenko L., Shcherkin V. Застосування пульсаційного диспергатора як гідродинамічного кавітаційного реактора для готування водовугільного палива. Теплофізика та Теплоенергетика. 2023. 45(1). С. 28–34. [Фахове видання]. (Вклад здобувача – участь в постановці задачі, розробці методики дослідження, виконанні експериментальних досліджень, підготовці матеріалів для публікації).

23. Obodovych O., Sydorenko V., Tselen B., Rezakova T. Спосіб зниження солей жорсткості води і тепломасообмінне обладнання для його реалізації. Теплофізика та Теплоенергетика. 2023. 45(2). С. 87–94. [Фахове видання]. (Вклад здобувача – участь в постановці задачі, розробці методики дослідження, виконанні експериментальних досліджень, підготовці матеріалів для публікації).

24. Obodovych O., Sydorenko V., Tselen B. Y., Stepanova O. Ефект кавітації та його застосування при очищенні стічних вод об'єктів теплоенергетики, промисловості, побуту і сільського господарства. Теплофізика та Теплоенергетика. 2023. 45(4). С. 70–82. [Фахове видання]. (Вклад здобувача – участь в постановці задачі, виконанні досліджень, підготовці матеріалів для публікації).

25. Ivanitsky G. K., Tselen B. Ya., Nedbailo A. Ye., Radchenko N. L., Gozhenko L. P. Some problems of modeling the liquid cavitation degassing. I. Acoustic cavitation. Фізика аеродисперсних систем. 2023. № 61. С. 227–240. [Фахове видання]. (Вклад здобувача – участь в постановці задачі, виконанні чисельного експерименту, обробці результатів).

26. Недбайло А., Іваницький Г., Целень Б., Радченко Н., Гоженко, Л. Використання кавітаційних технологій для нейтралізації кислих середовищ. Ефективність процесу. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. 2023. (4). 60–63. [Фахове видання]. (Вклад здобувача – участь в постановці задачі, розробці методики дослідження, виконанні експериментальних досліджень, підготовці матеріалів для публікації).

27. Obodovych O., Tselen B., Pereiaslavl'tseva O., Stepanova O. Дискретно-імпульсне введення енергії – ефективний метод видалення гідрокарбонату кальцію та зменшення жорсткості води. Теплофізика та Теплоенергетика. 2024. 46(3). С. 33–43. [Фахове видання]. (Вклад здобувача – участь в постановці задачі, розробці методики дослідження, виконанні експериментальних досліджень, підготовці матеріалів для публікації).

28. Obodovych O., Tselen B. Y., Pereiaslavl'tseva O., Stepanova O. Кавітаційні технології та нове тепломасообмінне обладнання – перспективний напрямок приготування водовугільного палива. Теплофізика та Теплоенергетика. 2024. 46(3).

С. 91–102. [Фахове видання]. (Вклад здобувача – участь в постановці задачі, розробці методики дослідження, виконанні експериментальних досліджень, підготовці матеріалів для публікації).

29. Obodovych O. M., Sablii L. A., Nedbailo A. Ye., Tselen B. Ya., Stepanova O. O. Technologies and heat exchange equipment for treatment and utilization of wastewater from thermal power plants. Вода і водоочисні технології. Науково-технічні вісті. 2024. Том 38 № 1. С. 3–13. [Фахове видання]. (Вклад здобувача – участь в постановці задачі, розробці методики дослідження, виконанні експериментальних досліджень, підготовці матеріалів для публікації).

**Розділи в колективних монографіях:**

30. Гоженко Л., Радченко Н., Іваницький Г., Лимар А., Сидоренко В., Целень Б., Ободович О. Дискретно-імпульсне введення енергії в технологіях підготовки води. Scientific Environment of Modern Human. 2021. 1(sua19-01). С. 47–62. [Index Copernicus]. (Вклад здобувача – участь в постановці задачі, виконанні експериментальних досліджень, підготовці матеріалів для публікації).

31. Obodovych O., Sydorenko V., Tselen B., Stepanova O., Rezakova, T. Application of discrete-pulse energy input for intensification of preparation of drinking and process water by aeration oxidation. European Science. 2023. 1(sge24-01). P. 59–67. [Index Copernicus]. (Вклад здобувача – участь в постановці задачі, виконанні експериментальних досліджень, підготовці матеріалів для публікації).

32. Stepanova O., Tselen B., Sydorenko V., Obodovych, O. Wastewater treatment using cavitation effects. European Science. 2023. 2(sge20-02). P. 35–42. [Index Copernicus]. (Вклад здобувача – участь в постановці задачі, підготовці матеріалів для публікації).

33. Buliy V., Obodovych O., Sablii L., Tselen B., Pereiaslavl'tseva O., Stepanova O. Technology and equipment for reducing water hardness through effective removal of calcium hydrocarbonate. European Science. 2024. 3(sge27-03). P. 84–94. (Вклад здобувача – участь в постановці задачі, виконанні експериментальних досліджень, підготовці матеріалів для публікації).

**Статті в закордонних виданнях:**

34. Dolinskyi A.A., Obodovych O.M., Tselen B.Ya., Sydorenko V.V., Ivanytskyi H.K., Lyumar A.Yu., Radchenko N.L. Intensification of water treatment technology by discrete-pulse energy input. SWorldJournal. 2022. Issue 11, Part 1. P. 56–61. [Index Copernicus]. (Вклад здобувача – участь в постановці задачі, виконанні експериментальних досліджень, підготовці матеріалів для публікації).

35. Tselen B. Ya., Radchenko N.L., Ivanytskyi H.K., Pereiaslavl'tsev O.M., Shchepkin V.I., Shulyak V.V. Features of wastewater treatment in cavitation flows. Modern engineering and innovative technologies. 2022. Issue 19, Part 1. P. 52–56. [Index Copernicus]. (Вклад здобувача – участь в постановці задачі, виконанні експериментальних досліджень, підготовці матеріалів для публікації).

36. Obodovych O.M., Ivanytsky G.K., Tselen B.Ya., Radchenko N.L., Nedbailo A.Y., Shulyak V.V. Mathematical simulation of fuels production processes based on water-oil emulsion by hydrodynamic cavitation method. Modern engineering and innovative

technologies. 2022. Issue 24, Part 1. P. 47–55. [*Index Copernicus*]. (Вклад здобувача – участь в постановці задачі, підготовці матеріалів для публікації).

37. Bogdan Tselen, Georgiy Ivanitsky, Anna Nedbaylo, Nataliya RADCHENKO. Prospects for the use of cavitation mechanisms in order to reduce the consumption of natural water in municipal energy. Journal of New Technologies in Environmental Science (JNTES). 2022. No. 2, Vol. 6. P. 53–58. [*Crossref*]. (Вклад здобувача – участь в постановці задачі, розробці методики дослідження, виконанні досліджень, підготовці матеріалів для публікації).

38. Anna Nedbailo, Georgiy Ivanitsky, Bogdan Tselen, Oleksandr Obodovych, Nataliya Radchenko, Liubov Gozhenko. Neutralization of acidic condensate obtained after combustion of natural gas using the hydrodynamic cavitation method. features and efficiency of the process. Journal of New Technologies in Environmental Science (JNTES). 2024. No. 1, Vol. 8. P. 12–17. [*Crossref*]. (Вклад здобувача – участь в постановці задачі, розробці методики дослідження, виконанні досліджень, підготовці матеріалів для публікації).

**Наукові праці, які засвідчують апробацію результатів дисертації:**

39. Іваницький Г.К., Недбайло А.Е., Коник А.В., Целень Б.Я., Гоженко Л.П. Унифицированный подход к моделированию кавитационных реакторов. XVII Міжнародна наукова конференція «Удосконалення процесів і обладнання харчових та хімічних виробництв 2018». м. Одеса. 3 – 8 вересня 2018. С. 84–89. (Вклад здобувача – співавторство наведених положень і результатів досліджень).

40. Іваницький Г.К., Целень Б.Я., Недбайло А.Е., Коник А.В. Исследование дегазации жидкости в кавитационных течениях. Проблемы моделирования. VII Міжнародна науково-практична конференція «Інноваційні енерготехнології». м. Одеса. 9 – 13 вересня 2019. С. 11–16. (Вклад здобувача – співавторство наведених положень і результатів досліджень).

41. Іваницький Г.К., Целень Б.Я., Радченко Н.Л., Гоженко Л.П. Исследование процессов дегазации жидкостей с использованием эффектов кавитации. XVII Міжнародна науково-технічна конференція «Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування». м. Харків, НТУ «ХПІ». 27–28 квітня 2021. С. 71–72. (Вклад здобувача – співавторство наведених положень і результатів досліджень).

42. Bogdan Tselen, Georgiy Ivanytskyi, Anna Nedbaylo, Nataliya Radchenko. Prospects for the use of cavitation mechanisms in order to reduce the consumption of natural water in municipal energy. VI International Scientific-Technical Conference “Actual Problems of Renewable Energy, Construction and Environmental Engineering”. Poland, Kielce University of Technology. 24–27 November 2022. P.28. (Вклад здобувача – участь у постановці задачі і виконанні досліджень).

43. Целень Б.Я., Іваницький Г.К., Радченко Н.Л., Недбайло А.Є. Застосування кавітаційних механізмів для раціонального споживання води в енергетиці. XIII Міжнародна онлайн-конференція «Проблеми теплофізики та теплоенергетики». м. Київ. 7 – 8 листопада 2023. С. 21. (Вклад здобувача – співавторство наведених положень і результатів досліджень).

**Наукові праці, які додатково відображують наукові результати дисертації:**

44. Долінський А.А., Шурчкова Ю.О., Целень Б.Я. Безреагентна нейтралізація кислого конденсату продуктів згоряння природного газу та обладнання для її нейтралізації. Микро- и наноуровневые процессы в технологиях ДИВЭ: Тематический сборник статей / под общей ред. А.А. Долинского; Институт технической теплофизики НАН Украины. – К.: Академперіодика, 2015. – 464 с. С. 343–350.

45. Патент 114374 України, МПК C02F 1/66, C02F 1/34, C02F 103/02. Спосіб обробки води / Долінський А.А., Целень Б.Я., Гартвіг А.П., Коник А.В., Радченко Н.Л.; власник Інститут технічної теплофізики НАН України. Держпатент України. – № а201602746; заявл. 11.07.2016 ; опубл. 25.05.2017, Бюл. № 10/2017.

46. Патент 115628 України, МПК C02F 1/20, C02F 1/34, C02F 1/36, C02F 1/66, C02F 9/08. Пристрій для дегазації, нейтралізації та коригування фізико-хімічних властивостей водних систем / Долінський А.А., Шурчкова Ю.О., Гартвіг А.П., Целень Б.Я., Коник А.В., Радченко Н.Л., Маркін О.В., Шуляк В.В.; власник Інститут технічної теплофізики НАН України. Держпатент України. – № а201606178; заявл. 07.06.2016 ; опубл. 27.11.2017, Бюл. № 22/2017.

47. Патент 118407 України, МПК B01F 7/28. Пристрій для обробки рідини / Долінський А.А., Гартвіг А.П., Целень Б.Я., Коник А.В., Радченко Н.Л.; власник Інститут технічної теплофізики НАН України. Держпатент України. – № а201705347; заявл. 31.05.2017 ; опубл. 10.01.2019, Бюл. № 1/2019.

48. Патент 99823 України, МПК B06B 1/10, B06B 1/18, B01F 7/12. Роторно-імпульсний апарат / Яроцький С. М., Целень Б. Я.; власники Яроцький С. М., Целень Б. Я. Держпатент України. – № u201414163; заявл. 30.12.14 ; опубл. 25.06.15, Бюл. № 12/2015.

49. Патент 124362 України, МПК C02F 1/12, C02F 1/34, C02F 1/66, C02F 1/20. Пристрій для дегазації, нейтралізації та коригування фізико-хімічних властивостей водних систем / Гартвіг А.П., Целень Б.Я., Коник А.В., Іваницький Г.К., Радченко Н.Л., Недбайло А.Є., Шуляк В.В.; власник Інститут технічної теплофізики НАН України. Держпатент України. – № а201910901; заявл. 04.11.2019 ; опубл. 01.09.2021, Бюл. № 35/2021.

50. Патент 127191 України, МПК B01 F27/94. Пристрій для змішування рідин / Гартвіг А.П., Целень Б.Я., Іваницький Г.К., Радченко Н.Л., Гоженко Л.П.; власник Інститут технічної теплофізики НАН України. Держпатент України. – № а202006177; заявл. 24.09.2020 ; опубл. 31.05.2023, Бюл. № 22/2023.

## АНОТАЦІЯ

**Целень Б. Я.** Розвиток наукових основ застосування методу гідродинамічної кавітації при обробці і дегазації рідин та водоочищенні. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.14.06 – «Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика» – Інститут технічної теплофізики НАН України, Київ.

В дисертаційній роботі розглядаються завдання, що пов'язані з розвитком наукових основ застосування механізмів гідродинамічної кавітації в багатофазних

дисперсних середовищах в процесах дегазації рідин, водоочищення, створення альтернативних видів палива з використанням експериментальних і теоретичних методів дослідження.

Виконаний аналіз сучасного стану досліджень у сфері кавітаційних, тепломасообмінних і гідродинамічних процесів в багатофазних середовищах, розглянуто динамічний розвиток бульбашок в рідині як специфічну реалізацію принципу дискретно-імпульсного введення енергії, що природно призводить до формування кавітаційних явищ. Досліджено умову рівноваги в системі «парогазові бульбашки – рідина» в процесі кавітаційного закипання і описано подальшу еволюцію бульбашки. Розроблено математичну модель, що описує динаміку парогазових бульбашок у стисливій рідині з урахуванням ефектів сферичного гідравлічного удару, також створені математичні моделі для розрахунку сопла Вентурі та роторно-пульсаційного апарата як кавітаційних реакторів для опису розподілу тиску і швидкості в потоці рідини. Створено математичну модель, що описує процеси деформації і руйнування дисперсій в зсувних течіях, встановлено критерій їх руйнування. Створено експериментальні установки і проведено дослідження впливу гідродинамічної кавітації на інтенсифікацію технологічних процесів обробки і дегазації рідин та водоочищення. Надано рекомендації щодо практичного застосування отриманих результатів в технологічних процесах очищення і дегазації рідин, водопідготовки, отримання водовугільних суспензій.

**Ключові слова:** роторно-пульсаційний апарат, сопло Вентурі, кавітаційний реактор, дегазація, тепломасообмін, нейтралізація, обробка рідини, диспергування.

## SUMMARY

**Tselen B. Ya.** Development of Scientific Foundations of the Application of Hydrodynamic Cavitation in Liquid Treatment, Degassing, and Water Purification. – The manuscript.

The thesis for the degree of doctor of technical sciences, specialty 05.14.06 – "Technical thermal physics and industrial combined heat and power", Institute of Engineering Thermophysics NAS Ukraine, Kyiv.

The dissertation addresses tasks related to the development of scientific foundations for the application of hydrodynamic cavitation mechanisms in multiphase dispersed media during processes such as liquid degassing, water purification, and the production of alternative fuels, using both experimental and theoretical research methods.

An analysis of the current state of research in the fields of cavitation, heat and mass transfer, and hydrodynamic processes in multiphase media has been conducted. The dynamic evolution of bubbles in liquid is considered as a specific realization of the discrete-pulse energy input principle, which naturally leads to the formation of cavitation phenomena. The equilibrium condition in the "vapor-gas bubbles – liquid" system during cavitation boiling is investigated, and the subsequent evolution of the bubble is described. A mathematical model has been developed to describe the dynamics of vapor-gas bubbles in a compressible liquid, considering the effects of spherical hydraulic shock. Mathematical models have also been created for calculating the Venturi nozzle and the rotor-pulsation apparatus as cavitation reactors to describe the pressure and velocity

distribution in the liquid flow. A mathematical model describing the processes of deformation and breakup of dispersions in shear flows has been developed, and a criterion for their disintegration has been established. Experimental setups were constructed, and studies were conducted on the influence of hydrodynamic cavitation on the intensification of technological processes for liquid treatment, degassing, and water purification. Recommendations are provided for the practical application of the results obtained in technological processes of liquid purification and degassing, water treatment, and the production of coal-water suspensions.

**Key words:** rotor-pulsation device, Venturi nozzle, cavitation reactor, degassing, heat and mass transfer, neutralization, liquid treatment, dispersion.