

**Національна академія наук України
Інститут технічної теплофізики**

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

Целень Богдан Ярославович

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

ДИСЕРТАЦІЯ

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

05.14.06 – Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ **Богдан ЦЕЛЕНЬ**

Науковий консультант: Олександр Миколайович Ободович,
доктор технічних наук, професор

Київ – 2025

АНОТАЦІЯ

Цель Б. Я. Розвиток наукових основ застосування методу гідродинамічної кавітації при обробці і дегазації рідин та водоочищенні. – на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.14.06 – Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика. – Інститут технічної теплофізики Національної академії наук України, Київ, 2025.

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

Використання потужних кавітаційних механізмів є на сьогодні одним з найбільш дієвих способів досягнення високих енергетичних показників в технологіях, пов'язаних з обробкою рідких дисперсних середовищ з метою підвищення швидкості проведення операцій диспергування, гомогенізації, екстрагування, емульгування, стерилізації тощо. Протягом останніх років у світі спостерігається тенденція широкого використання кавітації для прискорення тепломасообмінних, гідродинамічних, біохімічних мікромасштабних процесів та для енергетичного впливу на структуру сировини і біологічні об'єкти, пошуку нових можливостей керування процесами на мікро- та нанорівні та застосовування принципово нових нетрадиційних методів інтенсифікації таких процесів.

Протягом останніх чотирьох-п'яти десятиліть акустична кавітація була достатньо вивчена для її застосування в наукових дослідженнях різних хімічних та фізичних процесів, однак ультразвукові технології не знайшли широкого застосування в промислових масштабах через погану передачу і нестабільний просторово-часовий розподіл акустичної енергії та, головним чином, через високі експлуатаційні витрати та низьку енергетичну ефективність.

З цих причин гідродинамічна кавітація, яка забезпечує високу ефективність, універсальність і масштабованість, розглядається як більш дешева альтернатива акустичній кавітації для промислового застосування у різних переробних галузях промисловості. З 1990 року спостерігається експоненційне зростання досліджень механізмів та методів гідродинамічної кавітації. Серед цих публікацій можна виділити такі основні напрямки, як застосування кавітації в очищенні стічних вод, системах водопідготовки, аерації та дегазації рідин, а також в енергетиці, біотехнології, хімічній, нафтопереробній, харчовій та інших галузях промисловості. Однак достовірний аналіз механізмів кавітації ускладнюється труднощами проведення експериментальних досліджень в часовому та просторовому наномасштабах та відсутністю узагальнюючих математичних моделей з максимальним урахуванням визначальних фізичних факторів тому подальші дослідження в цьому напрямку є актуальними.

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

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 процесів акустичної, гідродинамічної, парової, електророзрядної та лазерної кавітації, їх переваги і недоліки, основні типи

гідродинамічних кавітаційних реакторів на прикладі діафрагми або пластини з одним чи декількома отворами, сопла Вентурі, роторно-пульсаційного апарата і пульсаційного диспергатора. Також розглянуто 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. Наведено аналіз сучасного стану методів дегазації рідини на прикладі традиційних методів (хімічних, фізичних і механічних) і методів кавітаційної дегазації (акустичної і гідродинамічної), їх переваги і недоліки, огляд патентів по кавітаційній дегазації рідин та аналіз сучасного стану проблеми нейтралізації кислого конденсату продуктів згоряння природного газу. На основі аналізу проблеми сформульовані завдання дослідження.

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), наведено розроблене обладнання і напрямки розвитку. Обґрунтовано, що застосування сукупності бульбашок, що містяться в рідині і які динамічно розвиваються, повинно розглядатись як окремий спосіб реалізації принципу ДІВЕ, з якого логічно випливає поняття кавітації як потужного механізму цього принципу. Показано, що існуючі моделі для опису динаміки бульбашки в нестисливій рідині призводять до деяких неправдоподібних висновків, а наявні модифікації рівняння Релея–Плесета для урахування стисливості рідини недостатньо точно описують даний процес. На базі подальшої модифікації математичної моделі ДОБ шляхом застосування модифікованого рівняння Релея–Плесета вперше проведено моделювання динаміки парогазових бульбашок у стисливій рідині з урахуванням ефектів сферичного гідравлічного удару. Проаналізовано з точки зору термодинаміки процеси ізотермічного та ізобаричного закипання рідини та умови порушення рівноваги в системі «парогазові бульбашки – рідина» в процесі кавітаційного закипання в ізотермічному режимі, визначено умову

активації бульбашки для її необмеженого зростання і наведено рівняння для розрахунку критичного тиску і критичного радіуса активованих бульбашок. Розглянуто моделювання сопел Вентурі, виведено формули для розрахунку сопла Вентурі заданої геометрії за різних робочих режимів з урахуванням гідродинамічних опорів на всіх ділянках каналу. Наведено рівняння розрахунку масової витрати рідини через сопло Вентурі для стаціонарного режиму його роботи. Показано, що при високих швидкостях потоку на вході в сопло і при достатньому звуженні каналу тиск в рідині досягає високого негативного значення, що забезпечує активацію значної кількості газових зародків і більш інтенсивні ефекти кавітації. Проведено моделювання процесів деформування та руйнування рідких та газових дисперсій в зсувних течіях в міжциліндрових зазорах РПА. Пояснено механізм так званого вибухового розтягування та руйнування крапель та газових бульбашок в зсувних течіях. Вперше встановлено критерій незворотної деформації та наступного руйнування рідинних та газових дисперсій в зсувних течіях, який не залежить ні від теплофізичних властивостей суцільної та дисперсної фаз, ні від режимних параметрів роботи РПА. Проведено моделювання кавітаційних процесів в радіально спрямованих каналах ротора і статора РПА і моделювання динамічної дії зсувних напружень, які є потужним жорстким механізмом принципу ДІВЕ. Наведено систему алгебраїчних рівнянь математичної моделі течії рідини через радіальні канали РПА, що описують періодичну зміну тисків в локальних точках каналу на вході і на виході роторів та статора з точним урахуванням питомих величин гідравлічних опорів залежно від числа Рейнольдса, а також поточні значення масової витрати рідини через канали РПА.

В *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. Досліджено вплив конструктивних і режимних параметрів РПА, кількості циклів обробки і вмісту твердої фази на максимальний розмір частинок вугілля при його диспергуванні. Визначений дисперсний розподіл розміру частинок вугілля в отриманій суспензії, конструктивні і режимні параметри роботи обладнання для отримання водовугільної суспензії, що можна використовувати як універсальне водовугільне паливо. Також проведено дослідження впливу гідродинамічної обробки з використанням модифікованого пульсаційного диспергатора як альтернативи РПА для готування водовугільного палива. Досліджено вплив швидкості зсуву потоку, кількості циклів обробки в РПА та концентрації розчину гідроксиду амонію на водневий показник води, концентрацію іонів кальцію і загальну жорсткість води. Встановлено, що застосування РПА дозволяє підвищити продуктивність процесу пом'якшення води та інтенсифікувати його при відносно низьких питомих енергетичних витратах.

В *четвертому* розділі викладено методику розрахунку сопла Вентурі і обґрунтування вибору РПА як кавітаційних реакторів для дегазації рідини. Проаналізовано умови ініціювання процесів на початковій стадії кавітації та процеси формування, зростання і подальшої еволюції парогазових бульбашок на базі створеної в ІТТФ НАН України математичної моделі динаміки бульбашкового ансамблю, яка враховує силову взаємодію бульбашок в ансамблі, що дозволяє розраховувати тиск в рідині всередині кавітаційного кластера і визначити момент початку кавітації. Здійснена попередня оцінка розподілу за розміром газових мікробульбашок у воді з отриманням залежності, що дозволяє при заданні початкового розміру бульбашок у монодисперсному ансамблі визначити їхню концентрацію і точніше прогнозувати розвиток ситуації при скиданні тиску. Наведено методику і виконано чисельні експерименти з вивчення початкової стадії кавітації – формування та еволюції кавітаційного кластера, що визначає інтенсивність процесу дегазації використовуючи створені субмоделі кавітаційного реактора на базі сопла Вентурі та кавітаційного реактора на базі РПА. Проведений

аналіз результатів дослідження і зроблені висновки стосовно вилучення нерозчиненого діоксиду вуглецю з конденсату. Обґрунтовано переваги і перспективність запропонованого методу нейтралізації рідини від вуглекислоти.

У *п'ятому* розділі наведені експериментальні дослідження процесу дегазації рідини з застосуванням гідродинамічних кавітаційних реакторів на базі сопла Вентурі та РПА. Здійснено оцінку ефективності процесу гідродинамічної кавітаційної дегазації застосовуючи практичні і аналітичні дослідження. Стверджується, що ефективність перебігу процесу залежить від можливості активації найдрібніших бульбашок газу для чого потрібно створювати в рідині високі розтягувальні зусилля (низький негативний тиск) при цьому ефективність дегазації методом гідродинамічної кавітації досить висока, що підтверджується експериментальними даними. Визначено динаміку зміни вмісту розчиненої вугільної кислоти залежно від тривалості гідродинамічної обробки рідини. Проведене експериментальне дослідження динаміки зміни вмісту розчиненої вугільної кислоти і теоретичні дослідження процесу зростання газопарових бульбашок в рідині та еволюції сукупності парогазових бульбашок до моменту досягнення критичної величини газовмісту.

У *шостому* розділі наведено дослідження по нейтралізації кислого конденсату продуктів згоряння димових газів від вугільної кислоти, техніко-економічне обґрунтування доцільності розроблення дослідного зразка установки для нейтралізації кислого конденсату продуктів згоряння природного газу, спецустаткування для його комплектування і основні складові. Також наведені основні технічні характеристики обладнання, опис конструкції і принцип роботи. Викладені результати експериментальних досліджень визначення зміни величини водневого показника, температури і електропровідності конденсату продуктів згорання природного газу і модельної рідини від тривалості обробки, а також від тривалості їх зберігання. Визначено, що вилучення основної кількості вуглекислоти з конденсату відбувається протягом перших двох хвилин обробки. На базі отриманих результатів експерименту обґрунтовано оптимальні параметри процесу

обробки конденсату продуктів згорання природного газу з метою його нейтралізації від вуглекислоти.

В *сьомому* розділі розглянуто перспективи реалізації досліджуваних процесів для промислового застосування. Викладено результати досліджень і проведених випробувань дослідного зразка установки для безреагентної нейтралізації кислого конденсату продуктів згорання природного газу розробленого в рамках виконання науково-технічної роботи «Розроблення двокамерної установки для безреагентної нейтралізації кислих конденсатів продуктів згорання газу в опалювальних та промислових котельнях» за Державним замовленням згідно договору № ДЗ/52-2015 від 30.10.2015 р., номер державної реєстрації 0115U005525. Проведено попередні випробування розробленого обладнання, надано рекомендації щодо оптимізації його роботи, визначено оптимальну продуктивність його роботи. Також наведені результати лабораторних досліджень фізико-хімічних параметрів конденсату продуктів згорання природного газу і модельної рідини до і після обробки на дослідному зразку установки нейтралізатора безреагентного проведені в екологічній лабораторії підприємства «ЕКОМЕДСЕРВІС». Надано рекомендації щодо застосування обладнання на базі РПА для отримання універсального водовугільного палива для спалювання в котлах, печах, різноманітному теплоенергетичному обладнанні, двигунах внутрішнього згорання тощо, зниження жорсткості води з метою її використання в теплоенергетиці. Показано перспективу застосування гідродинамічної обробки водовугільної суспензії з використанням модифікованого пульсаційного диспергатора як альтернативи РПА для готування водовугільного палива.

В узагальнюючих **висновках** наводиться перелік основних наукових і практичних результатів, одержаних у дисертаційній роботі.

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 кавітаційній обробки дисперсних рідинних сумішей в процесах водоочищення та створення водовугільних суспензій дістало подальший розвиток наукове обґрунтування методу інтенсифікації цих механізмів, який базується на застосуванні сукупності бульбашок, які динамічно розвиваються в потоці рідини, що проходить через гідродинамічний кавітаційний реактор.

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

4. Вперше встановлено критерій незворотної деформації та подальшого руйнування рідинних та газових дисперсій в зсувних течіях $(a/R)_{cr} = 2,2$, який не залежить 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 одиначної бульбашки та динаміки бульбашкового ансамблю створено модель кавітаційної дегазації рідини, використовуючи яку, проведено обчислювальні експерименти по деаерації води з використанням сопла Вентурі та роторно-пульсаційного апарата як гідродинамічного кавітаційного реактора, які забезпечують можливість генерувати більше бульбашок і збільшувати час їх перебування в дифузорі перед входом в завантажувальну вакуумну камеру.

Практичне значення отриманих результатів:

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

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

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

4. Запропоновано практичні шляхи підвищення ефективності промислових кавітаційних технологій очищення води від шкідливих (агресивних) газів, водопідготовки з метою пом'якшення води і диспергування водовугільної суспензії для приготування універсального водовугільного палива.

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

6. В рамках проведення досліджень по обробці води після скрубера лабораторної установки гранульованих мінеральних добрив на дослідному зразку установки нейтралізатора безреагентного отримано рекомендацію щодо можливості оснащення нейтралізатором безреагентним технологічної схеми виробництва гранульованих мінеральних добрив для зниження екологічного навантаження на оточуюче середовище і впроваджено в навчальний процес отримані теоретичні результати (акт впровадження від 23.11.2017 р., кафедра МАХНВ інженерно-хімічного факультету 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 РПА для застосування в технологіях дегазації та очищення рідин. Дана методика дозволяє проводити на базі удосконаленої моделі процесу дегазації рідини обчислювальні експерименти по визначенню закономірності розвитку кавітаційного бульбашкового кластера залежно від концентрації та початкового розміру парогазових зародків і обґрунтовувати оптимальні режими роботи обладнання (акт впровадження від 03.12.2024 р., кафедра МАХНВ інженерно-хімічного факультету НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»).

Практичне значення результатів роботи підтверджується одержаними патентами України:

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

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

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.

Перелік публікацій:

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 B.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., Tcelen B.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 B.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., Lyamar 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., Pereiaslavitsev 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. Иваницкий 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.

ANNOTATION

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

The thesis for the degree of doctor of technical sciences, specialty 05.14.06 – „Engineering thermophysics and industrial heat power engineering”– Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2025.

The dissertation work is devoted to the development of scientific and practical foundations of physical mechanisms of energy impact of the Discrete-Pulse Input of Energy principle on water systems, as well as the development of practical ways to increase the efficiency of industrial technological processes of treatment and purification water based on hydrodynamics cavitation.

The use of powerful cavitation mechanisms is currently one of the most effective methods for achieving high energy performance in technologies related to the treatment of liquid dispersed media. It aims to increase the speed of operations such as dispersion, homogenization, extraction, emulsification, sterilization, and others. In recent years, there has been a global trend toward the widespread application of cavitation to accelerate heat and mass transfer, hydrodynamic, and biochemical microscale processes. It is also used to exert energetic influence on the structure of raw materials and biological objects, to explore new possibilities for controlling processes at the micro- and nanoscale, and to apply fundamentally new, unconventional methods for intensifying such processes.

Over the past four to five decades, acoustic cavitation has been sufficiently studied for its application in scientific research involving various chemical and physical processes. However, ultrasonic technologies have not found widespread use at an industrial scale due to poor transmission and unstable spatiotemporal distribution of acoustic energy, and most notably, due to high operational costs and low energy efficiency.

For these reasons, hydrodynamic cavitation—which offers high efficiency, versatility, and scalability—is considered a more cost-effective alternative to acoustic

cavitation for industrial applications across various processing industries. Since 1990, there has been an exponential increase in research on the mechanisms and methods of hydrodynamic cavitation. Among these publications, key areas include the use of cavitation in wastewater treatment, water purification systems, liquid aeration and degassing, as well as in energy, biotechnology, chemical, petrochemical, food, and other industrial sectors. However, a reliable analysis of cavitation mechanisms is complicated by the challenges of conducting experimental studies at temporal and spatial nanoscales, and by the lack of comprehensive mathematical models that fully account for the defining physical factors. Therefore, further research in this field remains highly relevant.

The dissertation has the structure of a completed research paper. The text of the dissertation consists of an introduction, seven chapters, conclusions, a list of used literary sources with 470 titles, and five appendices. The total volume of the dissertation is 338 pages of typewritten text. The work contains 102 figures and 38 tables.

In the introduction, the relevance of the dissertation topic is substantiated, its connection with scientific programs, plans, and themes is defined, the aim and main research objectives are formulated, the object, subject, and research methods are considered, and the scientific novelty and practical significance of the obtained results are determined. Information is provided on the approbation of the dissertation results, the author's personal contribution, published results, as well as the structure and volume of the work.

Chapter One presents a review of the current state of research on cavitation processes and phenomena, the modern state of liquid degassing methods, and the issue of neutralizing acidic condensate resulting from natural gas combustion. It examines the conditions for initiation and the specific characteristics of acoustic, hydrodynamic, vapor, electro-discharge, and laser cavitation processes, along with their advantages and disadvantages. The main types of hydrodynamic cavitation reactors are reviewed, including diaphragms or plates with one or multiple openings, Venturi nozzles, rotor-pulsation devices, and pulsation dispersers. The mechanisms of hydrodynamic cavitation are discussed using examples of symmetric and asymmetric bubble collapse, cavitation

erosion of solid surfaces, and the influence of gas content on the degree of material erosion. A critical analysis of existing mathematical models of cavitation processes is provided. The chapter also includes an overview of current liquid degassing methods, comparing traditional approaches (chemical, physical, and mechanical) with cavitation-based methods (acoustic and hydrodynamic), highlighting their strengths and limitations. A review of patents related to cavitation degassing of liquids is presented, along with an analysis of the current state of the problem of neutralizing acidic condensate from natural gas combustion products. Based on this analysis, the research objectives are formulated.

Chapter Two examines cavitation processes and provides a theoretical description of the dynamics of a single bubble (SBD model) and a bubble ensemble (BED model) within the framework of the Discrete-Pulse Input of Energy (DPIE) principle developed at the Institute of Technical Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine. The chapter presents the developed equipment and directions for further advancement. It is substantiated that the use of a set of dynamically evolving bubbles in a liquid should be considered a distinct method of implementing the DPIE principle, from which the concept of cavitation as a powerful mechanism of this principle logically follows. It is shown that existing models describing bubble dynamics in incompressible liquids lead to certain implausible conclusions, and that current modifications of the Rayleigh–Plesset equation accounting for liquid compressibility do not adequately describe the process. Based on further modifications of the SBD mathematical model using a revised Rayleigh–Plesset equation, the dynamics of vapor-gas bubbles in a compressible liquid were modeled for the first time, incorporating the effects of spherical hydraulic shock. From a thermodynamic perspective, the chapter analyzes isothermal and isobaric boiling processes and the conditions for equilibrium disruption in the "vapor-gas bubbles – liquid" system during cavitation boiling in an isothermal regime. The activation condition for unlimited bubble growth is defined, and equations for calculating the critical pressure and critical radius of activated bubbles are provided. The modeling of Venturi nozzles is discussed, with formulas derived for calculating nozzles of specified geometry under various operating conditions, taking into account hydrodynamic resistance across all sections of

the channel. An equation is presented for calculating the mass flow rate of liquid through the Venturi nozzle under steady-state operation. It is shown that at high flow velocities at the nozzle inlet and with sufficient channel narrowing, the pressure in the liquid reaches significantly negative values, which activates a large number of gas nuclei and intensifies cavitation effects. The chapter also includes modeling of deformation and destruction processes of liquid and gas dispersions in shear flows within inter-cylinder gaps of the rotor-pulsation apparatus (RPA). The mechanism of so-called explosive stretching and breakup of droplets and gas bubbles in shear flows is explained. For the first time, a criterion for irreversible deformation and subsequent destruction of liquid and gas dispersions in shear flows is established, which is independent of the thermophysical properties of the continuous and dispersed phases, as well as the operating parameters of the RPA. Cavitation processes in radially directed channels of the rotor and stator of the RPA are modeled, along with the dynamic action of shear stresses, which serve as a powerful and rigid mechanism of the DPIE principle. A system of algebraic equations is presented for the mathematical model of liquid flow through the radial channels of the RPA, describing the periodic pressure changes at local points at the inlet and outlet of the rotor and stator, with precise consideration of specific hydraulic resistance values depending on the Reynolds number, as well as the current values of the liquid mass flow rate through the RPA channels.

Chapter Three presents research on the application of cavitation processes to intensify hydrodynamic effects during liquid treatment. To address the tasks of improving the quality indicators of the resulting products, studies were conducted on the impact of cavitation processes within the framework of the DPEI principle for the preparation of coal-water slurry as a universal coal-water fuel and for reducing water hardness during its treatment for boiler feed systems, demonstrating high efficiency of its application. The influence of design and operational parameters of the rotor-pulsation apparatus (RPA), the number of treatment cycles, and the solid phase content on the maximum particle size of coal during dispersion was investigated. The particle size distribution of coal in the resulting slurry was determined, along with the design and operational parameters of the

equipment used to produce coal-water slurry, which can be utilized as a universal coal-water fuel. Additionally, the effect of hydrodynamic treatment using a modified pulsation disperser as an alternative to the RPA for coal-water fuel preparation was studied. The influence of flow shear rate, number of treatment cycles in the RPA, and the concentration of ammonium hydroxide solution on the water's hydrogen index (pH), calcium ion concentration, and overall water hardness was examined. It was established that the use of the RPA enhances the efficiency of the water softening process and intensifies it at relatively low specific energy consumption.

Chapter Four outlines the methodology for calculating the Venturi nozzle and provides a rationale for selecting rotor-pulsation apparatus units as cavitation reactors for liquid degassing. Analyzes the conditions for initiating processes at the early stage of cavitation, as well as the formation, growth, and subsequent evolution of vapor-gas bubbles based on a mathematical model of bubble ensemble dynamics developed at the Institute of Technical Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine. This model accounts for the force interactions between bubbles within the ensemble, enabling the calculation of pressure in the liquid inside a cavitation cluster and determining the moment of cavitation onset. A preliminary assessment of the size distribution of gas microbubbles in water was conducted, resulting in a dependency that allows, given the initial bubble size in a monodisperse ensemble, the determination of their concentration and more accurate prediction of behavior during pressure drop. A methodology was presented, and numerical experiments were carried out to study the initial stage of cavitation—formation and evolution of the cavitation cluster—which defines the intensity of the degassing process. These experiments utilized developed submodels of cavitation reactors based on the Venturi nozzle and the rotor-pulsation apparatus (RPA). The results of the study were analyzed, and conclusions were drawn regarding the removal of undissolved carbon dioxide from condensate. The advantages and potential of the proposed method for neutralizing liquid from carbonic acid were substantiated.

Chapter Five presents experimental studies of the liquid degassing process using hydrodynamic cavitation reactors based on the Venturi nozzle and the rotor-pulsation apparatus (RPA). The efficiency of hydrodynamic cavitation degassing was evaluated through both practical and analytical investigations. It is asserted that the effectiveness of the process depends on the ability to activate the smallest gas bubbles, which requires generating high tensile forces (low negative pressure) in the liquid. The efficiency of degassing via hydrodynamic cavitation is shown to be quite high, as confirmed by experimental data. The dynamics of dissolved carbonic acid content variation depending on the duration of hydrodynamic treatment were determined. Experimental research was conducted on the change in dissolved carbonic acid concentration, along with theoretical studies of the growth of vapor-gas bubbles in the liquid and the evolution of the bubble ensemble until the critical gas content threshold is reached.

Chapter Six presents research on the neutralization of acidic condensate from flue gas combustion products of coal acid, as well as a techno-economic justification for the development of a pilot unit for neutralizing acidic condensate from natural gas combustion products. It also includes specialized equipment for its assembly and outlines its main components. The chapter also outlines the key technical specifications of the equipment, describes its design, and explains the operating principle. Experimental results are provided regarding changes in the hydrogen index (pH), temperature, and electrical conductivity of both the condensate and model liquid depending on treatment duration and storage time. It was determined that the majority of carbonic acid is removed from the condensate within the first two minutes of treatment. Based on the experimental findings, optimal parameters for the treatment process of natural gas combustion condensate were substantiated to ensure effective neutralization of carbonic acid.

Chapter Seven explores the prospects for industrial implementation of the studied processes. It presents the results of research and testing of a pilot unit designed for reagent-free neutralization of acidic condensate from natural gas combustion products. This system was developed as part of the scientific and technical project “Development of a two-chamber installation for reagent-free neutralization of acidic condensates from gas

combustion in heating and industrial boiler systems,” commissioned by the state under contract No. DZ/52-2015 dated October 30, 2015, with state registration number 0115U005525. Preliminary testing of the developed equipment was conducted, and recommendations were provided for optimizing its operation, including determining its optimal performance capacity. The chapter also includes results of laboratory studies on the physicochemical parameters of natural gas combustion condensate and model liquid before and after treatment using the prototype reagent-free neutralization unit. These studies were carried out in the environmental laboratory of the company “EKOMEDSERVICE.” Recommendations are provided for the use of RPA-based equipment to produce universal coal-water fuel for combustion in boilers, furnaces, various thermal power equipment, and internal combustion engines, as well as for reducing water hardness for use in thermal energy systems. The potential of hydrodynamic treatment of coal-water slurry using a modified pulsation disperser as an alternative to the RPA for fuel preparation is also demonstrated.

The summarizing conclusions include a list of the main scientific and practical results obtained in the dissertation work.

Scientific novelty:

1. Using a mathematical model of single bubble dynamics, the existence of a divergence effect between two pulsating bubbles of different sizes in an acoustic field was discovered for the first time. This contradicts the well-known Bjerknes law of force interaction between pulsating bubbles and contributes to the understanding of acoustic cavitation processes, particularly the mechanism of acoustic degassing of liquids. A criterion was established for the transition of two differently sized bubbles in an ultrasonic field from a convergence regime to a divergence regime.

2. Based on experimental studies and theoretical analysis using a bubble ensemble dynamics model, the scientific justification for the method of intensifying cavitation treatment mechanisms of dispersed liquid mixtures in water purification and the creation of coal-water suspensions was further developed. This method is based on the use of a set

of bubbles dynamically evolving in a liquid flow passing through a hydrodynamic cavitation reactor.

3. Using the single bubble dynamics model, the dynamics of vapor-gas bubbles in a compressible liquid were simulated, taking into account the effects of spherical hydraulic shock. A simple equation describing the dynamics of a single bubble in a compressible liquid was derived for the first time by modifying the Rayleigh–Plesset equation. The modified equation introduces only one parameter—the adiabatic compressibility coefficient of the liquid, β_{ad} , which depends on temperature. This allows for a more accurate assessment of the liquid's compressibility at the boundary with a thermic in a supercritical fluid state.

4. A criterion for irreversible deformation and subsequent destruction of liquid and gas dispersions in shear flows was established for the first time: $(a/R)_{cr} = 2.2$. This criterion is independent of the thermophysical properties of the continuous and dispersed phases, Reynolds number, and shear stress magnitude, and can be considered a physical constant. The presented model can predict the deformation behavior of droplets and the conditions for their destruction in shear flows with greater accuracy than existing empirical relationships.

5. A simple relationship was obtained for the first time to estimate the number of air microbubbles per unit volume of water depending on their radius, based on a generalization of known experimental data on free air content in water.

6. The influence of microbubble concentration in a liquid and their initial radius on vaporization kinetics was studied for the first time, and conditions for phase inversion in a vapor-gas-liquid mixture flow were determined.

7. The application of hydrodynamic cavitation degassing of liquids for neutralizing acidic condensate from natural gas combustion products was further developed. It was found that for effective degassing, it is necessary to ensure a maximally high rate of pressure drop in the liquid to minimal negative values, initiating the growth of the smallest gas nuclei by setting the required inlet pressure to the nozzle, selecting the optimal throat diameter, and maintaining minimal outlet pressure at the Venturi nozzle.

8. Based on modifications of the single bubble dynamics and bubble ensemble dynamics models, a model of cavitation degassing of liquids was created. Using this model, computational experiments were conducted on water deaeration using a Venturi nozzle and a rotary-pulsation device as a hydrodynamic cavitation reactor. These devices enable the generation of more bubbles and increase their residence time in the diffuser before entering the loading vacuum chamber.

Practical significance of the obtained results:

1. The use of cavitation mechanisms based on the Discrete-Pulse Energy Input principle has been proposed and implemented for the development of energy-efficient equipment for liquid treatment and purification. This is grounded in analytical and experimental studies of hydrodynamic and heat-mass transfer processes in complex heterogeneous systems.

2. Pilot-industrial test benches have been developed to study the processes of liquid treatment and degassing using hydrodynamic cavitation reactors based on the Venturi nozzle and the rotor-pulsation apparatus. A separate pilot-industrial bench was created to investigate hydrodynamic treatment using a modified pulsation disperser as an alternative to the rotor-pulsation apparatus for coal-water fuel preparation.

3. An improved methodology has been developed for calculating hydrodynamic cavitation reactors based on the Venturi nozzle and rotor-pulsation apparatus to determine pressure changes in the liquid as it passes through the cavitation reactor.

4. Practical approaches have been proposed to enhance the efficiency of industrial cavitation technologies for water purification from harmful (aggressive) gases, water softening, and dispersion of coal-water slurry for the production of universal coal-water fuel.

5. As part of the scientific and technical project commissioned by the Ministry of Education and Science of Ukraine under contract No. DZ/52-2015 (State Registration No. 0115U005525), a prototype installation for neutralizing acidic condensate from natural gas

combustion products was developed and tested under conditions close to industrial (acceptance test report dated 16.12.2016).

6. During research on water treatment after the scrubber of a laboratory installation for granular mineral fertilizer production, recommendations were obtained for integrating the reagent-free neutralizer into the technological scheme to reduce environmental impact. The theoretical results were incorporated into the educational process (implementation report dated 23.11.2017, Department of Machines and Apparatuses of Chemical and Petroleum Refining Industries, Faculty of Chemical Engineering, NTUU “Igor Sikorsky KPI”).

7. Submodels of cavitation reactors based on the Venturi nozzle and rotor-pulsation apparatus were created, which can be used as individual components in the overall model of the cavitation degassing process. The mathematical model describing cavitation kinetics in the Venturi nozzle was integrated into academic disciplines (implementation report dated 08.11.2021, Department of Machines and Apparatuses of Chemical and Petroleum Refining Industries, Faculty of Chemical Engineering, NTUU “Igor Sikorsky KPI”).

8. The improved methodology for calculating hydrodynamic cavitation reactors based on the Venturi nozzle and rotor-pulsation apparatus has been incorporated into academic courses such as “Processes and Equipment of Chemical Technology,” “Engineering of Innovative Technologies and Equipment,” and “Prospective Directions in the Development of Energy- and Resource-Efficient Processes, Equipment, and Technologies.” This allows computational experiments to be conducted using the enhanced degassing model to determine the development patterns of cavitation bubble clusters depending on the concentration and initial size of vapor-gas nuclei, and to justify optimal operating modes of the equipment (implementation report dated 03.12.2024, Department of Machines and Apparatuses of Chemical and Petroleum Refining Industries, Faculty of Chemical Engineering, NTUU “Igor Sikorsky KPI”).

The practical significance of the results is confirmed by the following Ukrainian patents:

– Method for Water Treatment (Patent No. 114374, Ukraine);

- Device for Degassing, Neutralization, and Adjustment of Physicochemical Properties of Aqueous Systems (Patent No. 115628, Ukraine);
- Device for Liquid Treatment (Patent No. 118407, Ukraine);
- Device for Degassing, Neutralization, and Adjustment of Physicochemical Properties of Aqueous Systems (Patent No. 124362, Ukraine);
- Rotor-Impulse Apparatus (Utility Model Patent No. 99823, Ukraine).

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

ЗМІСТ

УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ	43
ВСТУП	47
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ДОСЛІДЖЕНЬ КАВІТАЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ ТА ЯВИЩ	50
1.1. Поняття кавітації. Основні положення	51
1.1.1. Умови ініціювання кавітаційних процесів	51
1.1.2. Різновиди кавітації	55
1.1.2.1. Акустична кавітація	55
1.1.2.2. Гідродинамічна кавітація	57
1.1.2.3. Парова кавітація	59
1.1.2.4. Електророзрядна кавітація	61
1.1.2.5. Лазерна кавітація	61
1.1.3. Гідродинамічні кавітаційні реактори	62
1.1.3.1. Кавітаційний реактор з діафрагмою	67
1.1.3.2. Кавітаційний реактор на основі сопла Вентурі	69
1.1.3.3. Ротаційні гідродинамічні кавітаційні реактори	70
1.1.3.4. Лабораторні експериментальні стенди з дослідження процесів гідродинамічної кавітації	72
1.1.4. Механізми гідродинамічної кавітації	73
1.1.4.1. Симетричний колапс	74
1.1.4.2. Асиметричний колапс	77
1.1.4.3. Ерозійне руйнування твердих поверхонь	79
1.1.5. Моделювання процесів кавітації	80
1.1.5.1. Модель кавітації	80
1.1.5.2. Модель гідродинаміки каналу	83
1.2. Аналіз сучасного стану методів дегазації рідини	84
1.2.1. Традиційні методи дегазації рідин	85

1.2.2. Акустична дегазація. Застосування методів акустичної дегазації	89
1.2.3. Кавітаційна гідродинамічна дегазація рідини. Активація газових мікрозародків	93
1.2.4. Експериментальні дослідження з гідродинамічної кавітаційної дегазації	96
1.2.4.1. Зниження газового фактора в гідравлічних рідинах	98
1.2.4.2. Дегазація рідини для інтенсифікації кавітаційних ефектів	100
1.2.4.3. Видалення небажаного газу	105
1.2.4.4. Огляд патентів по кавітаційній дегазації	107
1.3. Аналіз сучасного стану проблеми нейтралізації кислого конденсату продуктів згоряння природного газу	115
1.4. Висновки до розділу, постановка мети і завдань дослідження	124
РОЗДІЛ 2. СТВОРЕННЯ І ЗАСТОСУВАННЯ МОДЕЛЕЙ КАВІТАЦІЇ	127
2.1. Основні положення принципу дискретно-імпульсного введення енергії	127
2.1.1. Кавітація як потужний механізм ДІВЕ	130
2.1.2. Апарати створені за принципом ДІВЕ	131
2.1.3. Напрямки розвитку концепції ДІВЕ	132
2.2. Математичні моделі кавітації, створені на основі концепції ДІВЕ .	134
2.2.1. Система рівнянь моделі динаміки одичної бульбашки	135
2.2.2. Система рівнянь моделі динаміки ансамблю бульбашок	138
2.2.3. Модифікація моделей	141
2.2.3.1. Врахування стисливості рідини	141
2.2.3.2. Моделювання кінетики кавітаційного закипання рідини. Активація газових мікрозародків	143
2.2.3.3. Моделі гідродинаміки каналу	143

2.3. Моделювання динаміки кавітаційних бульбашок в стисливих рідинах	145
2.3.1. Сучасний стан досліджень динаміки бульбашок в стисливій рідині	145
2.3.2. Модель динаміки бульбашок в стисливій рідині на основі механізму гідравлічного удару	151
2.4. Моделювання кінетики кавітаційного закипання рідини	160
2.4.1. Термодинамічний аналіз процесів ізотермічного та ізобаричного закипання рідини	160
2.4.2. Умови порушення рівноваги в системі «парогазові бульбашки – рідина» в процесі кавітаційного закипання в ізотермічному режимі	163
2.4.3. Розрахунок критичного тиску та критичного радіуса активованих бульбашок	168
2.5. Моделювання сопла Вентурі	171
2.5.1. Загальний розрахунок сопла Вентурі	173
2.5.2. Розподіл тиску і швидкості в потоці рідини по довжині сопла	177
2.6. Моделювання процесів в роторно-пульсаційному апараті	178
2.6.1. Руйнування дисперсій в каналах і зазорах РПА	178
2.6.2. Моделювання процесів деформування та руйнування дисперсій в зсувних течіях	181
2.6.3. Моделювання течії рідини через радіальні канали РПА	189
2.7. Висновки до розділу 2	195
РОЗДІЛ 3. ЗАСТОСУВАННЯ КАВІТАЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ ДЛЯ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ГІДРОДИНАМІЧНОГО ВПЛИВУ ПРИ ОБРОБЦІ РІДИН	197

3.1. Основні технічні характеристики застосованого РПА як кавітаційного реактора	198
3.2. Дослідження впливу гідродинамічної обробки на диспергування водовугільної суспензії	200
3.2.1. Аналіз сучасного стану існуючих способів і обладнання для отримання водовугільного палива	201
3.2.2. Опис експериментальної бази та методики проведення експерименту	204
3.2.3. Результати експериментальних досліджень та їх обговорення	206
3.3. Дослідження впливу гідродинамічної обробки з використанням пульсаційного диспергатора як альтернативи РПА для готування водовугільного палива	211
3.3.1. Опис експериментальної бази та методики проведення експерименту	212
3.3.2. Результати експериментальних досліджень та їх обговорення	216
3.4. Дослідження впливу гідродинамічної обробки на зміну рН, концентрацію іонів кальцію і жорсткість води	220
3.4.1. Аналіз сучасного стану проблеми видалення з води гідрокарбонату кальцію та зниження загальної жорсткості води	221
3.4.2. Опис експериментальної бази та методики проведення експерименту	222
3.4.3. Результати експериментальних досліджень та їх обговорення	225
3.5. Висновки до розділу 3	233

РОЗДІЛ 4. РОЗРАХУНОК ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ЗДІЙСНЕННЯ ОПЕРАЦІЙ КАВІТАЦІЙНОЇ ДЕГАЗАЦІЇ РІДИН	236
4.1. Моделювання сопла Вентурі як кавітаційного дегазатора	236
4.1.1. Методика розрахунку сопла Вентурі як кавітаційного реактора	238
4.1.2. Розрахунок раціональної геометрії та оптимальних режимів роботи сопла Вентурі	242
4.1.2.1. Процедура розрахунку оптимального діаметра горловини сопла Вентурі	242
4.1.2.2. Об'ємна витрата рідини через сопло в кавітаційному режимі	245
4.2. Застосування роторно-пульсаційного апарата як гідродинамічного кавітаційного реактора для дегазації рідин	246
4.2.1 Особливості зміни тиску в рідині у вихідному перерізі статора роторно-пульсаційного апарата	247
4.2.2. Руйнування газових дисперсій під дією зсувних напружень в міжциліндрових зазорах РПА	249
4.3. Визначення розподілу за розміром газових зародків у воді	252
4.3.1. Алгоритм розрахунку газовмісту рідини	253
4.3.2. Визначення загального числа бульбашок в одиниці об'єму рідини	257
4.3.3. Визначення об'ємного вмісту газу в рідині	258
4.4. Розрахунок сопла Вентурі як кавітаційного дегазатора	258
4.4.1. Проведення обчислювальних експериментів. Методика дослідження	258
4.4.2. Результати дослідження і їх обговорення	260
4.5. Розрахунок параметрів роторно-пульсаційного апарата дослідного зразка установки кавітаційної дегазації рідини	265

4.5.1. Моделювання процесу зростання газопарових бульбашок в рідині	265
4.5.2. Результати розрахунків	266
4.5.3. Аналіз результатів аналітичного дослідження	270
4.6. Висновки до розділу 4	272
РОЗДІЛ 5. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ДЕГАЗАЦІЇ РІДИНИ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ГІДРОДИНАМІЧНИХ КАВІТАЦІЙНИХ РЕАКТОРІВ НА БАЗІ СОПЛА ВЕНТУРІ ТА РПА	274
5.1. Опис експериментальної бази та методики проведення досліджень	274
5.2. Визначення зміни величини газовмісту водневого показника і температури рідини від тривалості її обробки з використанням сопла Вентурі як кавітаційного реактора	276
5.3. Визначення зміни величини газовмісту, водневого показника і температури рідини від тривалості її обробки з використанням РПА як кавітаційного реактора	278
5.4. Аналіз отриманих результатів	281
5.5. Висновки до розділу 5	288
РОЗДІЛ 6. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ НЕЙТРАЛІЗАЦІЇ КИСЛОГО КОНДЕНСАТУ ПРОДУКТІВ ЗГОРЯННЯ ПРИРОДНОГО ГАЗУ	290
6.1. Аналіз механізму утворення кислого конденсату продуктів згоряння природного газу	290
6.1.1. Розчинність діоксиду вуглецю у воді	293
6.1.2. Постановка задачі аналітичного дослідження	295
6.1.3. Розрахунок газовмісту діоксиду вуглецю в конденсаті	299

6.2. Розроблення лабораторної установки для нейтралізації кислого конденсату продуктів згоряння природного газу	304
6.2.1. Комплектування лабораторної установки	304
6.2.2 Основні технічні характеристики лабораторної установки	304
6.2.3. Опис лабораторної установки	305
6.3. Експериментальні дослідження процесу нейтралізації кислого конденсату продуктів згоряння природного газу	309
6.3.1. Методика проведення експериментальних досліджень	309
6.3.2. Визначення зміни величини водневого показника і температури модельної рідини від тривалості її обробки	313
6.3.3. Визначення зміни величини водневого показника і температури модельної рідини при роботі лабораторної установки в робочому режимі	313
6.3.4 Визначення зміни величини водневого показника модельної рідини до і після обробки від тривалості її зберігання	314
6.3.5. Визначення зміни величини водневого показника і температури конденсату продуктів згоряння природного газу від тривалості його обробки	316
6.3.6. Визначення зміни величини водневого показника конденсату продуктів згоряння природного газу до і після обробки від тривалості його зберігання	317
6.3.7. Аналіз отриманих результатів	319
6.4. Висновки до розділу 6	325
РОЗДІЛ 7. ПРОМИСЛОВЕ ЗАСТОСУВАННЯ ОБЛАДНАННЯ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ВПРОВАДЖЕННЯ	327
7.1. Розроблення інноваційного обладнання для безреагентної нейтралізації кислого конденсату продуктів згоряння природного газу	327

7.1.1. Визначення продуктивності дослідного зразка установки нейтралізатора безреагентного	327
7.1.2. Результати аналізів фізико-хімічних параметрів рідини до і після обробки на дослідному зразку установки нейтралізатора безреагентного	329
7.1.3. Вимірювання показників тиску і температури дослідного зразка установки нейтралізатора безреагентного під час роботи	329
7.1.4. Техніко-економічна ефективність запропонованого способу безреагентної нейтралізації	334
7.1.5. Рекомендації щодо промислового використання обладнання	336
7.2. Рекомендації щодо промислового використання обладнання для отримання універсального водовугільного палива	337
7.3. Рекомендації щодо промислового використання обладнання для зниження жорсткості води	338
7.4. Висновки до розділу 7	338
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	340
СПИСОК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ.....	345
ДОДАТОК А	391
ДОДАТОК Б	396
ДОДАТОК В	400
ДОДАТОК Г	403
ДОДАТОК Д	406

УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

a – головна піввісь еліпсоїда;

c – питома теплоємність;

c_{ac} – швидкість звуку;

D – діаметр;

d – діаметр бульбашки;

E – енергія;

e – ексцентриситет еліпсоїда;

f – частота коливань;

G_m – масова витрата;

G_V – об'ємна витрата;

G_{sh} – швидкість зсуву;

H – ентальпія;

h – висота;

J – масовий потік;

j – густина масового потоку;

L – довжина;

M – молекулярна маса;

m – маса;

N_b – кількість бульбашок в одиниці маси газорідинної суміші;

N_{or} – число прорізів в роторах і статорі РПА;

p – тиск;

Q – тепловий потік;

q – густина теплового потоку;

R – радіус;

$\tilde{R}$ – газова стала;

r – радіальна координата;

S – площа;

T – температура;

V – об'єм;

v, u – швидкість;

W – потужність;

w – радіальна швидкість;

x, y, z – декартові координати;

α – коефіцієнт випаровування (конденсації);

β – газовміст рідини;

β_{ad} – коефіцієнт адіабатичної стисливості рідини;

δ – ширина зазору між ротором і статором;

φ – потенціал швидкості;

λ – коефіцієнт тертя;

μ – динамічна в'язкість;

ν – кінематична в'язкість;

ρ – густина;

σ – поверхневий натяг;

τ – час;

$\Delta\tau$ – проміжок часу;

Ω – число обертів ротора;

ω – кутова швидкість;

ξ – коефіцієнт гідравлічного опору.

Індекси:

0 – початкове значення;

a – атмосферний;

abs – абсолютне значення;
ac – акустичний;
b – бульбашка;
boil – кипіння;
en – вхід;
ex – вихід;
ext – зовнішній;
con – конфузор;
dif – дифузор;
g – газ;
int – внутрішній;
k – кінцеве значення;
kin – кінетичний;
l – рідина;
m – масовий;
max – максимальне значення;
min – мінімальне значення;
out – зовнішній;
pot – потенціальний;
r – радіальний;
sat – насичений;
st – стандартний;
thr – горловина;
V – об’ємний;
v – пара;
x, y, z – декартові координати.

Скорочення:

ВВН – водокільцевий вакуумний насос;

ВВС – водовугільна суспензія;

ГД – гідродинамічний;

ГДКР – гідродинамічний кавітаційний реактор;

ДОБ – динаміка одиничної бульбашки;

ДІВЕ – дискретно-імпульсне введення енергії;

ДБА – динаміка бульбашкового ансамблю;

РКР – ротаційний кавітаційний реактор;

РПА – роторно-пульсаційний апарат;

ТМО – тепломасообмін;

УЗ – ультразвук.

ВСТУП

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 захопування 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 високоефективної технології спалювання штучних палив з твердих побутових відходів та біомаси у когенераційних енергоустановках з використанням водню, кисню, синтетичного газу та біометану для забезпечення енергетичної безпеки України. Том 4: Розроблення технології та обладнання для очищення води після конденсаційних теплоутилізаційних установок» (№ держ. реєстр. 0123U100945);

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

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

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

- «Теоретичні і експериментальні дослідження тепломасообміну в технологічних процесах з використанням методу дискретно- імпульсного введення енергії (ДІВЕ)» (№ держ. реєстр. 0115U000386);
- «Розроблення і впровадження дослідного зразка установки нейтралізації конденсату продуктів згорання природного газу» (№ держ. реєстр. 0113U006201);
- «Розроблення двокамерної установки для безреагентної нейтралізації кислих конденсатів продуктів згорання газу в опалювальних та промислових котельнях» (№ держ. реєстр. 0115U005525);
- «Розробка методів інтенсифікації процесів гідратації, гідролізу і екстракції на основі використання механізмів дискретно-імпульсного введення енергії» (№ держ. реєстр. 0112U004699);
- «Дослідження впливу кавітаційних ефектів в апаратах ДІВЕ на фізико-хімічні властивості водних систем» (№ держ. реєстр. 0115U005178);
- «Оптимізація енергоефективності в апаратах вакуумного та екструзійного типів» (№ держ. реєстр. 0109U005924);
- «Дослідження тепломасообміну при дискретно-імпульсному вводі енергії в гетерогенні системи з метою розробки нанотехнологій і їх реалізації» (№ держ. реєстр. 0107U002880).

РОЗДІЛ 1.

АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ДОСЛІДЖЕНЬ КАВІТАЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ ТА ЯВИЩ

Використання потужних кавітаційних механізмів є на сьогодні одним з найбільш дієвих способів досягнення високих енергетичних показників в технологіях, пов'язаних з обробкою рідких дисперсних середовищ з метою підвищення швидкості проведення операцій диспергування, гомогенізації, екстрагування, емульгування, стерилізації тощо. Протягом останніх років у світі спостерігається тенденція широкого використання кавітації для прискорення тепломасообмінних, гідродинамічних, біохімічних мікромасштабних процесів та для енергетичного впливу на структуру сировини і біологічні об'єкти.

Бурхливий розвиток в останні роки нано- та біотехнологій і розроблення інноваційних проектів і технологій в цих сферах науки та інженерії змушує науковців і фахівців в цих галузях відшукувати нові невідомі раніше можливості керування процесами на мікро- та нанорівні та застосовувати принципово нові нетрадиційні методи інтенсифікації таких процесів.

Протягом років кавітація вважалася одним з напрямків гідродинаміки, пов'язаного зі з'ясуванням і усуненням негативних причин ерозійного руйнування поверхонь гребних гвинтів, лопатей гідротурбін, гідротехнічних пристроїв. Встановлено, що ерозія поверхонь виникає, зокрема, через механічну дію ударних хвиль і кумулятивних струменів, які утворюються при захопленні сукупності бульбашок. Але на основі виключно цих механізмів важко пояснити руйнування молекулярних і колоїдних структур, ініціювання та прискорення хімічних реакцій, інші макро- і нанорівневі дії кавітаційних ефектів. При розгляді кавітації в рамках гідродинаміки не брався до уваги специфічний вплив термічних та хімічних факторів, які супроводжують кавітаційні ефекти.

Певною мірою такий підхід зберігається по теперішній час, хоча встановлено, що на стадії максимального стиснення температура парогазового середовища

всередині кавітаційної мікро-бульбашки досягає десятків тисяч градусів, а тиск зростає до десятка тисяч атмосфер. Доведено, що теплової енергії, яка виділяється в об'ємі бульбашки при її колапсі, достатньо для іонізації і дисоціації молекул парів води і присутніх в бульбашці газів, утворення вільних радикалів, а також прискорення на 5-6 порядків швидкостей газофазних хімічних реакцій і навіть (за деякими прогнозами) ініціювання в кавітаційних бульбашках реакцій термоядерного синтезу. Достовірний аналіз механізмів кавітації ускладнюється труднощами проведення експериментальних досліджень в часовому та просторовому наномасштабах та відсутністю узагальнюючих математичних моделей з максимальним урахуванням визначальних фізичних факторів.

1.1. Поняття кавітації. Основні положення

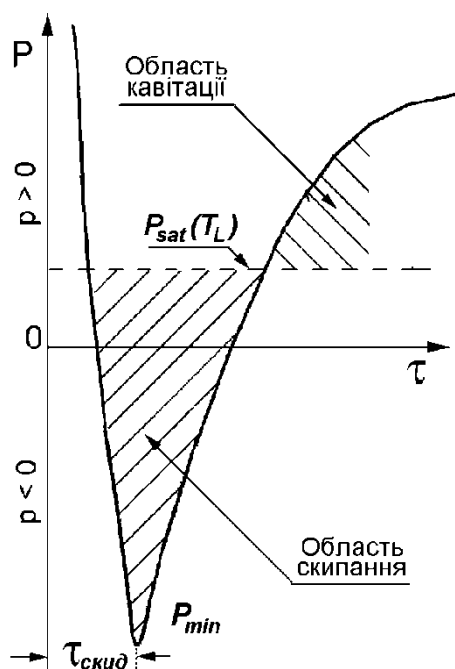
1.1.1. Умови ініціювання кавітаційних процесів

З огляду на різноманіття трактувань в літературі поняття кавітації найбільш прийнятним можна вважати наступне визначення кавітації, яке адекватно відображає суть кавітаційних процесів і кавітаційних явищ [1–6].

Кавітація – це такий розвиток парогазових бульбашок і рідинних бульбашкових систем, при якому завершальною стадією є захоплення (колапс) бульбашок. При цьому необхідною і достатньою умовою реалізації явища кавітації в рідині є *швидко* скинення тиску p_l в локальному об'ємі рідини до значень нижче тиску насиченої пари при даній температурі рідини $p_l < p_{sat}(T_{l0})$, а потім *різко* підвищення тиску до величини, що перевищує тиск насиченої пари $p_l > p_{sat}(T_{l0})$.

В цій трактовці ключовим словом є “швидко”.

Ці умови, схематично представлені на рис. 1.1, в рівній мірі відносяться і до акустичної і до гідродинамічної кавітації.



Принципово важливим є той факт, що для початку формування і зростання кавітаційних бульбашок тиск в рідині необхідно скинути до мінімального значення $p_{l\ min}$, яке може знаходитись в області від'ємних тисків ($p_{l\ min} < 0$). Іншими словами, рідина має перебувати в стані розтягнення. В теорії акустичної кавітації це є очевидним, бо інтенсивність акустичного поля і, відповідно, тиск в рідині поблизу поверхні УЗ генератора періодично змінюється з великою частотою від додатних до від'ємних значень в широкому інтервалі залежно від інтенсивності акустичного поля.

Рис. 1.1. Схематичне зображення характеру зміни тиску в рідині для реалізації кавітації.

Ще однією важливою умовою створення потужних кавітаційних ефектів, як зазначено вище, є вимога зменшення часу $\Delta\tau_{\text{скид}}$ — тривалості скидання тиску в рідині від $p_l = p_{l0}$ до $p_l = p_{l\ min}$. Як буде показано в наступних розділах, ця умова рівноцінна необхідності виконання першого критерію ефективності ДІВЕ [7–10], тобто, при використанні бульбашок в якості трансформаторів енергії необхідно за можливо найкоротший час забезпечити максимальну різницю тисків між фазами.

На практиці кавітаційні механізми реалізуються або за рахунок акустичного впливу на рідину з використанням різних УЗ випромінювачів, або шляхом створення оптимальних гідродинамічних умов в потоці рідини з обов'язковим виконанням вимоги $p_l < p_{sat}(T_l)$. Сукупність парогазових бульбашок, які формуються і зростають в рідині на стадії кавітаційного закипання при виконанні умови $p_l < p_{sat}(T_l)$ та одночасно захоплюється при виконанні умови $p_l > p_{sat}(T_l)$, називається “кавітаційним кластером”.

Це визначення в рівній мірі відноситься до акустичної кавітації, де падіння і зростання тиску обумовлено періодичним розтягуванням і стисненням локального об'єму рідини з частотою УЗ поля, і до гідродинамічної кавітації де розтягування рідини зумовлене проходженням швидкісного потоку рідини через коротку зону звуження каналу з наступним плавним переходом в канал з початковою площею перетину.

Одночасне захопування всіх бульбашок кластера на стадії колапсу супроводжується випромінюванням надзвичайно потужного сумарного акустичного імпульсу. «Тривалість життя» кавітаційного кластера, як в процесах акустичної так і гідродинамічної кавітації, дуже коротка. Час від початку формування бульбашки до її завершального колапсу вимірюється в масштабі мілісекунд.

В акустичному полі після захопування кавітаційного кластера на його місці

формується сукупність газових мікрозародків, з яких в наступному циклі УЗ коливань розвивається новий кластер.



Завдяки короткому періоду існування кластера на фотографіях і на відеокадрах він виглядає як стабільна хмаринка хоча в акустичному УЗ полі з частотою порядку 20 кГц протягом 1 секунди відбуваються 20000 циклів зростання та захопування бульбашкового кластера (рис.1.2).

Рис. 1.2. Типовий вигляд кавітаційного кластера, створеного за допомогою УЗ генератора в процесі акустичної кавітації (за даними [11]).

В процесах гідродинамічної кавітації на виході потоку зі звуженої ділянки каналу формується і зростає кавітаційний кластер. Після переходу кластера в розширену ділянку каналу і досягнення локальної зони, де виконується умова $p_l > p_{sat}(T_{l0})$, бульбашки на передньому фронті кластера різко захоплюються і далі в

каналі тече однофазна рідина. На стадії захлопування кавітаційних бульбашок в результаті одночасного колапсу сукупності парогазових бульбашок відбувається випромінювання високоамплітудних акустичних імпульсів тиску, які мають потужний динамічний і термічний вплив на оточуюче рідинне середовище, присутні в ньому дисперсій, а також молекулярні і біологічні структури.

На рис. 1.3 за даними роботи [12] представлено фотографію кавітаційного кластера, утвореного в процесі гідродинамічної кавітації при проходженні потоку води через звуження каналу, в даному випадку – через сопло Вентурі.



Рис. 1.3. Вигляд кавітаційного кластера, утвореного при проходженні потоку води через звуження каналу (за даними роботи [12]).

Отже, 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) [13–18]. Під терміном “захлопування кавітаційної бульбашки”, або її “колапсу”, мається на увазі стиснення бульбашки до такого ступеня, коли вся пара, присутня в об’ємі бульбашки, буде сконденсована, а в локальній зоні захлопування на місці бульбашки існуватиме лише рідинна фаза [18].

Проте, остаточне захлопування парогазової бульбашки і наступне її руйнування відбувається лише за умови, що кількість неконденсованого газу в об’ємі бульбашки відносно мала [19–22]. 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 захлопуванню бульбашки передують її затухаючі осциляції.

1.1.2. Різновиди кавітації

1.1.2.1. Акустична кавітація

В методах акустичної кавітації для зміни тиску в рідині застосовують ультразвук, зазвичай з частотою $f_{ac} \propto 100 \div 200$ кГц. Акустична енергія генерується шляхом передачі УЗ хвиль, які зумовлюють цикли розрідження та стиснення, що проходять через рідинне середовище. У циклі розрідження створюється великий негативний акустичний тиск ($p_l < 0$), що сприяє виконанню умов кавітації, тобто активації присутніх в рідині мікробульбашок. У наступному циклі стиснення рідини до значень $p_l > p_{sat}(T_l)$ виконуються умови захлопування бульбашок.

Експериментальне дослідження динаміки газових бульбашок в УЗ полі пов'язане з очевидними труднощами, враховуючи, що розміри досліджуваних об'єктів оцінюються в масштабі десятків нанометрів, а варіація розмірів, форми і розташування цих дисперсій протягом періоду коливань оцінюється в масштабах наносекунд. Незважаючи на успіхи у створенні прецизійних методів вимірювання (інфрачервона спектроскопія, ядерний магнітний резонанс та ін.) відомі на сьогодні експериментальні дані часто дуже суперечливі, що ускладнює можливість створення уніфікованих математичних моделей, здатних адекватно прогнозувати поведінку бульбашок стосовно завдань акустичної дегазації.

Виявлено, що в кавітаційному кластері бульбашки захлопуються з різною інтенсивністю при кожному наступному фронті зовнішньої хвилі УЗ, при цьому спостерігається періодичність високої і низької інтенсивності захлопування.

Кавітаційний кластер погано пропускає звукові хвилі. Після першого захлопування у зоні підвищеного тиску хвилі утворюється велика кількість кавітаційних зародків, котрі на стадії розрідження швидко розширюються і

об'ємний паро- та газовміст різко зростають і значна частина енергії звукової хвилі не проходить в товщу кластера. Як наслідок, наступне захопування відбувається менш інтенсивно, утворюється менша кількість життєздатних кавітаційних зародків і кількість бульбашок перед наступним півперіодом підвищеного тиску УЗ хвиля не досягає такої концентрації як перед попереднім, що збільшує акустичну провідність кавітаційного кластера і, як наслідок, підвищення тиску. Захопування ж бульбашок, у свою чергу, відбувається інтенсивніше. Далі картина періодично повторюється.

В останні чотири-п'ять десятиліть акустична кавітація була достатньо вивчена для її застосування в наукових дослідженнях різних хімічних та фізичних процесів, таких як синтез наночастинок [23], наноемульсифікація [24], мікрофлотація [25] екстрагування [26], очищення забруднених поверхонь та фільтрів [23, 27, 28], дегазація рідин [29–32] та металевих розплавів [33, 34], хімічний синтез з використанням реакції окислення [35–37], а також очищення стічних вод [38, 39]. Ефекти кавітаційного впливу на газорідинні системи знаходять застосування в різних галузях: у хіміко-технологічних та біотехнологічних реакторах [40], у харчовій [26, 41] і медичній [42, 43] промисловості. Основні сучасні проблеми, пов'язані з застосуванням методів УЗ кавітації в наукових дослідженнях і в промисловості детально описані в фундаментальних оглядових роботах [44–46].

Незважаючи на широкі і різноманітні дослідження, проведені протягом кількох десятиліть в наукових лабораторіях різних країн УЗ технології не знайшли застосування в промислових масштабах через погану передачу акустичної енергії в об'ємі рідини [47] і її нестабільний просторово-часовий розподіл в об'ємі рідини [47, 48], а, головне, через високі експлуатаційні витрати та низьку енергетичну ефективність [3, 49, 50].

З цих причин гідродинамічна кавітація (ГК), яка забезпечує високу ефективність, універсальність і масштабованість, розглядається як більш дешева альтернатива акустичній кавітації стосовно використання у різних переробних галузях промисловості [3, 16, 18, 19, 27, 50–55].

З 1990 року спостерігається експоненційне зростання досліджень механізмів та методів гідродинамічної кавітації, причому за даними [47] за останні 30 років кількість наукових публікацій з цієї теми зросла майже в 600 разів. Серед цих публікацій можна виділити такі основні напрямки, як застосування кавітації в очищенні стічних вод, системах водопідготовки, аерації та дегазації рідин, а також в енергетиці, біотехнології, хімічній, нафтопереробній, харчовій та інших галузях промисловості.

1.1.2.2. Гідродинамічна кавітація

Гідродинамічна кавітація виникає в апаратах проточного типу зі змінною геометрією каналу рідинного тракту, таких як трубка Вентурі, діафрагми, пластинки з отворами, отвір, канали роторно-пульсаційних апаратів і т. п. На ділянці звуження каналу швидкість стаціонарного потоку зростає і при достатньо високій швидкості, згідно з законом Бернуллі, тиск в рідині спадає до значень $p_l \ll p_{sat}(T_l)$, що спричиняє активацію мікробульбашок, їх безповоротне зростання і утворення кавітаційного кластера з високим газовмістом. На ділянці розширення каналу, тиск в рідині зростає до значень $p_l > p_{sat}(T_l)$ завдяки чому одночасно відбувається різке захоплення усіх бульбашок кластера [2, 11, 13–16, 19] з утворенням на місці кожної з них так званого “терміка”, або “гарячої точки” з локальною температурою $T_{l\max} \propto 1000$ К, тиском $P_{l\max} \propto 10^4$ МПа, швидкістю нагрівання чи охолодження порядку 10^{10} К/с] та часом життя $\Delta\tau \propto 20\div 40$ нс [18, 39, 49, 52, 56–62]. Протягом цього часу речовина всередині терміка перебуває в стані надкритичного флюїду [63–65].

Хоча інтенсивність колапсу мікро-бульбашок в процесах ГД кавітації менша у порівнянні з акустичною кавітацією, вона здатна генерувати і активувати більшу кількість ефективних мікробульбашок [3, 4] і забезпечити більший контроль за робочими параметрами та результуючою інтенсивністю кавітації [2, 66]. У разі великомасштабних процесів ГД технології мають більший потенціал через їх спроможність створювати умови, аналогічні маломасштабним процесам, але, на

відміну від УЗ кавітації, при менших матеріальних і енергетичних витратах [50, 51, 67, 68].

Кавітаційні методи успішно використовуються в сучасних технологіях, пов'язаних з обробкою рідких дисперсних середовищ, зокрема, для управління на молекулярному рівні фізичними, хімічним і біофізичним процесами в рідких середовищах, а також для локального енергетичного впливу на супрамолекулярні структури і клітинні мікроорганізми. Для вирішення цих задач важливим стає чітке розуміння фізичної природи кавітаційних механізмів та можливість їх адекватного опису у просторовому та тимчасовому мікро- та наномасштабі [23, 24, 69–79].

Здатність спричиняти потужні дискретно-імпульсні динамічні, термічні та хімічні впливи робить ГД кавітацію одним з найбільш дієвих способів досягнення високих енергетичних показників при обробці рідких дисперсних середовищ.

Гідродинамічна кавітація як технологія з перевагами в енергоефективності, простоті та потенціалі масштабування привернула особливий інтерес до різних практично важливих застосувань, таких як очищення промислових та побутових стічних вод [14, 37, 38, 75, 80–85], обробка нафти і нафтопродуктів, гідрокрекінг вуглеводнів нафти [86], а також, для одержання композиційних палив [87–89], створення водовугільних палив [87, 90–92], водопаливних емульсій [93–96] в процесах естерифікації, які застосовується при виробництві біопалива, а також в нафтопереробній, харчовій, косметичній та фармацевтичній галузях [14, 74, 97–99].

Широке застосування методи ГД кавітації знаходять в харчовій промисловості при обробці харчових продуктів [4, 18, 26, 41, 47, 100–103], зокрема молочних продуктів [104–108]. В оглядових статтях [103, 109] детально описано конструктивні аспекти та способи застосування ГД кавітаторів у пивоварінні, переробці соків та інших напоїв на рослинній основі.

ГД кавітаційні технології добре зарекомендувала себе в операціях мінеральної флотації [38, 73, 81, 110], формуванні наноемульсій [93, 104, 111, 112], синтезі наночастинок [23, 24, 41, 54, 73, 75, 77–79], для інактивації патогенних бактерій [47, 74, 100, 113–115] та розкладання органічних забруднювачів [14, 85, 116].

Кавітаційні механізми успішно використовуються сьогодні в біотехнологіях завдяки можливості спрямовано діяти на супрамолекулярні структури [57, 69, 98, 114–116, 117] та клітини мікроорганізмів, керувати кінетикою перебігу хімічних та біохімічних реакцій у розчинах [3, 35, 37, 52, 66, 77, 80, 118–121], зокрема руйнувати мікробні клітини для вилучення внутрішньоклітинних ферментів та метаболітів [74, 113], а також штучно створювати нанорозмірні ліпосоми як переносників лікарських засобів безпосередньо в клітини людини чи тварини або добрива в клітини рослин [41, 73, 74, 96, 98, 99, 117].

Відомо, що ефективність кавітаційного впливу в цих операціях тим вища, чим нижчий початковий газовміст рідини [20, 29, 48, 122–130]. Тому в багатьох кавітаційних технологіях попередня деаерація рідини є важливою стадією проведення цих операцій.

Разом з акустичною та гідродинамічною кавітацією широке практичне застосування знаходять методи парової та електророзрядної кавітації, а в наукових лабораторних дослідженнях – методи лазерної або оптичної кавітації.

1.1.2.3. Парова кавітація

Явища парової кавітації спостерігаються у разі внесення в холодну недогріту рідину гарячої парової бульбашки, яка містить перегріту пару. Рідина вважається недогрітою, якщо при заданих постійних значеннях p_{l0} і T_{l0} її температура нижча за температуру кипіння ($T_{l0} < T_{boil}(p_{l0})$). Пара в бульбашці буде перегрітою по відношенню до рідини, якщо $T_v > T_{boil}(p_{l0})$. Така ситуація виникає, приміром, при ежектуванні струменя перегрітої пари в холодну рідину [131–135].

Детальний теоретичний аналіз динамічних характеристик парової бульбашки в залежності від ступеня переохолодження рідини ступеня перегріву пари і початкового розміру бульбашки виконано в роботі [7].

Якщо у воду з температурою $T_{l0} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, що перебуває під тиском $p_{l0} = 1\text{ атм}$, через тонкий капіляр ввести бульбашку з перегрітим паром з температурою $T_v = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ і тиском $p_v = 1\text{ атм}$, то вже в момент появи бульбашки в системі

створюється термодинамічна нерівновага за рахунок високої початкової різниці температур пари і рідини, і з цього моменту відбувається інтенсивна конденсація перегрітої пари на холодній стінці бульбашки. Маса пари в бульбашці швидко зменшується і тиск пари різко спадає, що сприяє надзвичайно швидкому стисненню бульбашки ще й під дією різниці тисків та капілярних сил. На завершальній стадії максимального стиснення температура, тиск і густина пари в бульбашці досягають екстремальних значень. Починаючи з цього моменту відбувається різке розширення бульбашки з наступною затухаючою осциляцією або безповоротний колапс з випромінюванням потужних імпульсів [7, 135].

З точки зору гідродинаміки ізобаричний процес стиснення і захопування бульбашки з перегрітою парою в холодній рідині (парова кавітація) не відрізняється від ізотермічного процесу стиснення та захопування парогазової бульбашки при зміні зовнішнього тиску (гідродинамічна кавітація). Перевага механізму парової кавітації полягає у вилученні стадії активації присутніх в рідині мікрозародків, характерної для УЗ та ГД кавітації, а отже, усувається необхідність вибору технічних пристроїв для швидкої зміни тиску в системі, які завжди мають певні обмеження щодо швидкодії. Ще однією позитивною рисою парової кавітації є можливість створювати в рідині велику сукупність чисто парових бульбашок без вмісту стороннього газу, що забезпечує високу потужність динамічних імпульсів при колапсі таких бульбашок без необхідності попередньої дегазації рідини.

Очевидним недоліком є високі витрати на виробництво перегрітої пари, що обмежує практичне застосування методів парової кавітації.

Потужні динамічні ефекти, що виникають при дії струменів перегрітої пари утворюючи каверни у недогрітій рідині, можуть призводити до сильних руйнувань у трубопроводах живильних або охолоджувальних парогенераторів [137, 138]. Зокрема, саме ці ефекти є відповідальними за виникнення масштабних аварійних ситуацій на АЕС [136–141]. Разом з тим, відомі приклади практичного використання розглядуваного явища, в тому числі і для отримання дрібнодисперсних емульсій і суспензій [142–145].

1.1.2.4. Електророзрядна кавітація

Однією з можливостей створення в холодній рідині бульбашки з перегрітою парою і реалізації механізмів парової кавітації є низьковольтний розряд між двома контактуючими електродами для створення іскри, яка локально випаровує воду [146–151] або ініціювання електричного розряду при вибуху тонкого дроту, розміщеного між електродами [152–154]. Завдяки аномально високій температурі в просторі між електродами утворюється бульбашка з суттєво перегрітою парою, подальша еволюція якої співпадає з процесом парової кавітації аж до завершального колапсу. Перевага електророзрядної кавітації у порівнянні з паровою кавітацією полягає у простоті методу, високій ефективності і стабільності, а також можливості доволі точно керувати режимними параметрами [149–151].

Недоліком, особливо при проведенні наукових досліджень, є те, що всередині бульбашки крім пари знаходиться неконтрольована кількість нанофрагментів розплавленої ділянки електродів або вибухаючого дроту, а також неконденсованих газів [146, 148, 150, 151, 154]. Методи електророзрядної кавітації застосовуються для інтенсифікації процесів коагуляції, флотації [155], створенні водовугільних суспензій [156–157], при очищенні промислових стічних вод [156] та для видалення з води розчинених в ній газів [158].

1.1.2.5. Лазерна кавітація

Лазерна, або оптична кавітація генерується сфокусованим високоенергетичним променем світла, наприклад, лазером. У випадку опромінення холодної рідини енергія світла поглинається і нагріває локальну зону в її об'ємі. Коли локальна температура рідини перевищить температуру кипіння, всередині цієї зони виникають парові бульбашки, які швидко ростуть, а потім стискаються і захоплюються. Бульбашки, створені в рідині методом лазерної кавітації, далі поведуть себе так само, як парові бульбашки з перегрітою парою в недогрітій рідині. Відмінність полягає в тому, що методи лазерної кавітації дозволяють цілеспрямовано створювати одиночні бульбашки заданого розміру – від

нанометрових до міліметрових. Методи лазерної кавітації застосовуються переважно в наукових дослідженнях для детально вивчення механізмів кавітації. Приклади створення та застосування лазерної кавітації наводяться в [159–164].

В роботі [159] досліджено поведінку генерованих лазером парових бульбашок у воді в залежності від їх відстані до стінки. Результати експерименту обговорюються з огляду на механізм кавітаційної ерозії. В [160] парогазові бульбашки мікро- та нанометрових розмірів утворюються в результаті локального нагрівання водної суспензії шляхом безперервного лазерного випромінювання регульованої потужності, сфокусованого у фокальну пляму діаметром ≈ 100 мкм. Бульбашки можна легко переміщувати в об'ємі рідини разом з фокальною плямою.

Колапс лазерно-індукованих кавітаційних бульбашок поблизу жорсткої стінки досліджено в [161]. Проаналізовано осциляцію бульбашки поблизу стінки, а також мікрострумені та ударні хвилі, що генеруються колапсом.

В роботі [162] за допомогою швидкісної відеозйомки спостерігали відмінності у просторово-часовій еволюції та характеристиках колапсу кавітаційних бульбашок, індукованих лазером та електророзрядом. Виявлено, що вміст неконденсованого газу в бульбашках, індукованих лазером, нижчий, ніж у бульбашках, індукованих електророзрядом і, відповідно, інтенсивність імпульсу у лазерно-індукованих бульбашок значно вища.

Для розуміння впливу градієнтів швидкості та зсувних напружень на характер колапсу кавітаційної бульбашки автори роботи [164] дослідили поведінку лазерно індукованих бульбашок в потоці рідини у вузькому плоскому зазорі, створених як в центрі зазору, так і поблизу однієї зі стінок. Перенесення потоком центру мас бульбашки викликає її несиметричне захоплення, яке впливає на напрямок і силу струменя рідини.

1.1.3. Гідродинамічні кавітаційні реактори

Різноманітні типи акустичних або гідродинамічних пристроїв в активній зоні яких виконуються зазначені вище умови виникнення кавітації розглядаються як

кавітаційні реактори, що використовуються в лабораторних наукових дослідженнях і в різних промислових технологіях.

Кавітація відіграє негативну роль в багатьох гідравлічних системах та в пристроях. В тих місцях, де потік рідини зазнає місцевого звуження з подальшим розширенням, наприклад, в засувних і регулюючих органах, діафрагмах, заслінках, клапанах, соплах та інших елементах трубопроводів. В цих локальних зонах елементи трубопроводу зазнають найбільш руйнівної ерозійної дії кавітації, що приводить до аварійних ситуацій і скорочує термін експлуатації цих елементів.

Однак, саме ці традиційні елементи гідравлічних систем – трубки Вентурі, діафрагми, шайби, пластинки з одним або декількома отворами ефективно застосовуються сьогодні в якості робочих органів кавітаційних реакторів, які використовуються в наукових дослідженнях і в промисловості.

Як приклад можна навести відцентрові насоси, де кавітація є негативним шкідливим явищем, яке суттєво зменшує ККД насоса, веде до пошкодження крильчатки та інших його частин внаслідок механічної та хімічної ерозії матеріалів [165–166]. Навіть невелика кількість вільного газу в рідині значно погіршує антикавітаційні характеристики лопатевих насосів. Так, присутність у воді газу з об'ємною долею 1%, зменшує коефіцієнт швидкохідності насоса приблизно на 13% [167]. Тому запобігання небажаного кавітаційного закипання перекачуваної рідини і забезпечення необхідного кавітаційного запасу в насосі є обов'язковими вимогами при розробленні та експлуатації відцентрових насосів.

Але в деяких технологіях відцентрові насоси [168], а також шестерневі насоси [169, 170] використовують як ефективні кавітаційні реактори саме завдяки утворенню в них потужних кавітаційних ефектів, які спрямовані на інтенсифікацію конкретних технологічних процесів.

Для застосування механізмів *гідродинамічної кавітації* як ефективного засобу інтенсифікуючої дії при вирішенні науково-дослідних та прикладних задач використовуються такі типи кавітаційних реакторів:

- діафрагми або пластини з одним або з декількома отворами;

- сопла Вентурі;
- циліндричні та дискові роторно-пульсаційні апарати;
- пульсаційні диспергатори;
- відцентрові насоси.

На рис. 1.4 представлено основні типи кавітаційних реакторів, в яких реалізуються механізми гідродинамічної кавітації.

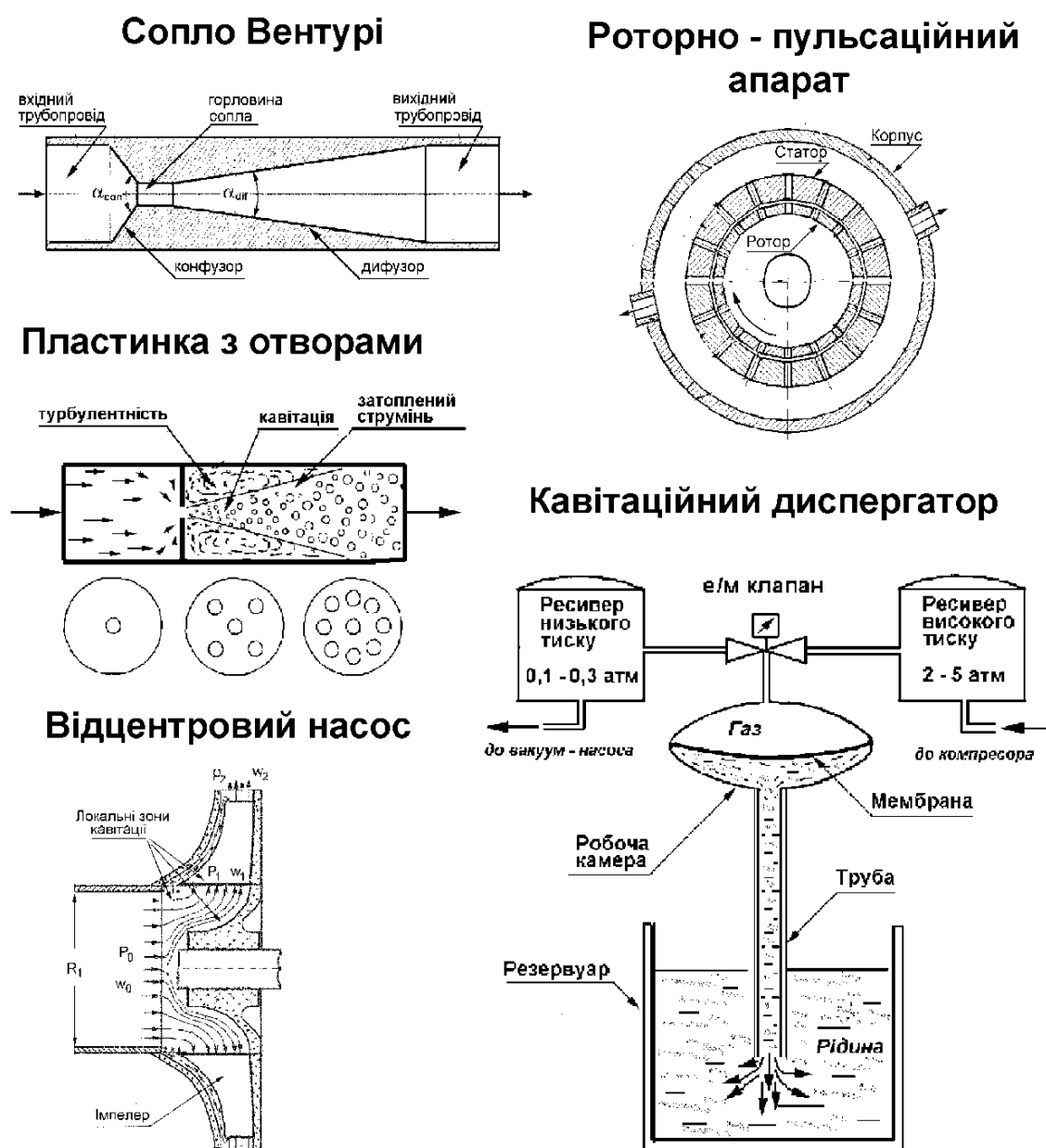


Рис. 1.4. Основні типи кавітаційних реакторів, в яких реалізуються механізми гідродинамічної кавітації.

Результати експериментів і теоретичні розрахунки свідчать про те, що умова скинення тиску в рідині до від'ємних значень ($p_{min} \ll 0$) для ініціювання кавітаційних ефектів виконується в будь-яких типах гідродинамічних і акустичних реакторів. Цей факт ілюструється даними, представленими на рис. 1.5.

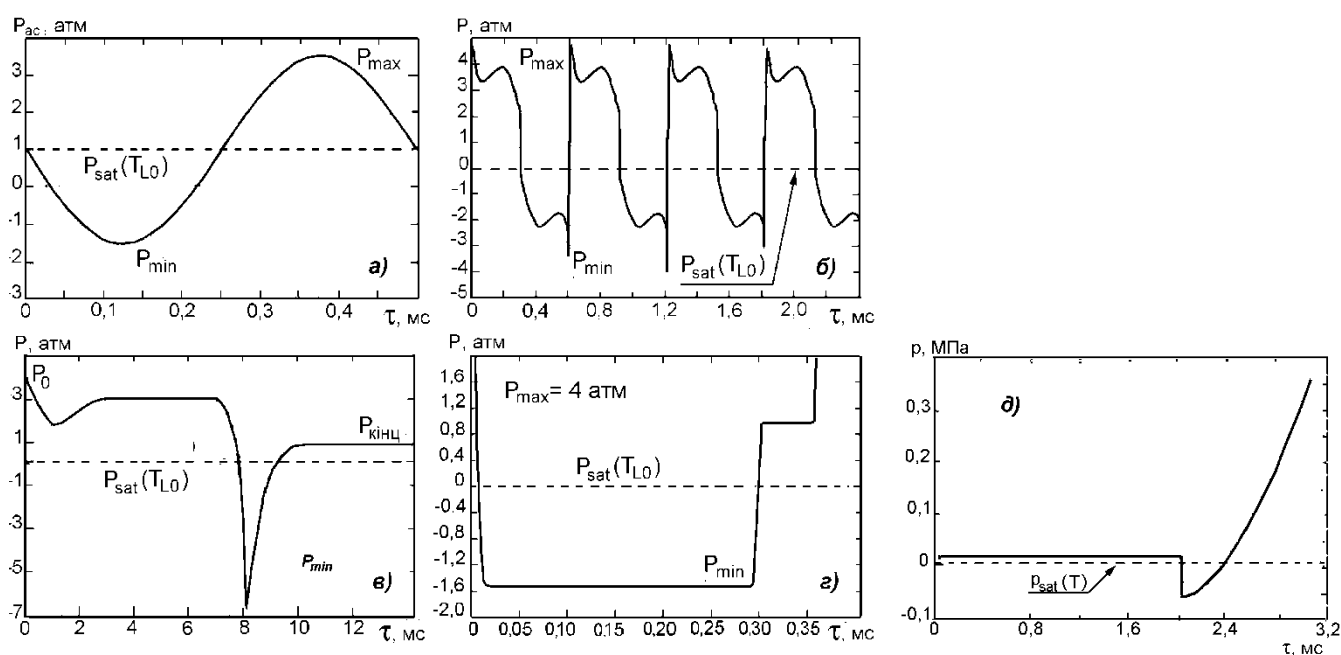


Рис. 1.5. Зміна з часом тиску в однофазній рідині (вода) в робочому об'ємі гідродинамічних кавітаційних реакторів різного типу. Розрахунки по моделі ДОБ:
а – УЗ генератор с частотою $f = 2$ кГц; **б** – циліндричний РПА; **в** – сопло Вентурі; **г** – пульсаційний диспергатор; **д** – відцентровий насос.

Гідродинамічна кавітація виникає в апаратах проточного типу зі змінною геометрією каналу рідинного тракту. На ділянці каналу зі зменшеною площею поперечного перерізу швидкість стаціонарного потоку зростає і, у відповідності до закону Бернуллі, тиск в рідині спадає до негативних значень. Графіки, представлені на рис. 1.5 показують, що зміна тиску рідини за один цикл роботи в усіх кавітаційних реакторах точно відповідає характеру зміни тиску, необхідному для реалізації кавітаційних ефектів, представлених на рис. 1.1. На стадії кипіння тиск спадає нижче тиску насиченої пари, а мінімальне значення тиску $p_{min} \ll 0$. На стадії

кавітації тиск зростає до значень $p_l > p_{sat}(T_0)$. Це є підтвердженням того, що всі ці апарати працюють як кавітаційні реактори.

Гідродинамічна кавітація зазвичай генерується шляхом створення відповідного звуження потоку рідини. Дроселювання створюється за допомогою різних пристроїв, таких як клапан, діафрагма, сопло Вентурі, високошвидкісний ротор, відцентрові насоси, струминні диспергатори, гомогенізатори високого тиску і т. п. Робочий тиск та структура потоку в кожному з цих пристроїв можуть різнитися залежно від їх конструкції, але принцип утворення кавітаційних бульбашок в них однаковий – виконання наведених вище умов ініціювання кавітації.

В літературі розглядаються переважно два основних типи ГДКР – стаціонарні та ротаційні ГДКР, які найчастіше застосовуються в наукових дослідженнях і в промислових технологіях.

У стаціонарних ГДКР як звужуючу ділянку каналу для збільшення лінійної швидкості потоку використовують трубки Вентурі, діафрагми або пластинки з одним чи декількома отворами. Завдяки простій геометричній конструкції, простоті виготовлення і експлуатації, високій продуктивності та економічності стаціонарні ГДКР застосовуються в лабораторних дослідженнях кавітаційних процесів.

Типові стаціонарні кавітаційні реактори в яких реалізуються ефекти гідродинамічної кавітації схематично представлені рис. 1.6.

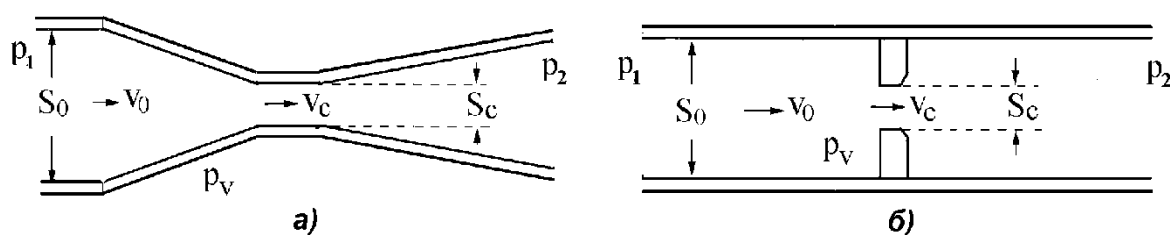


Рис. 1.6. Схема сопла Вентурі (а) і пластинки з отвором (діафрагма) (б).

Як два найпоширеніші ГД кавітаційні пристрої, діафрагма та сопло Вентурі мають схожі, але різні геометричні структури. Сопло Вентурі перевершує діафрагму в промисловому застосуванні завдяки більшій кількості утворених бульбашок та меншому енергоспоживанню [3, 52, 171, 172].

1.1.3.1. Кавітаційний реактор з діафрагмою

Діафрагма, яка є найбільш простим і часто застосовуваним лабораторним пристроєм для створення кавітації містить отвір, призначений для забезпечення заданих значень швидкості та тиску рідини на виході з отвору, а також заданої форми потоку. Типовий профіль тиску кавітаційного пристрою з діафрагмою показано на рис. 1.7 *а*, де p_1 – тиск на вході; p_2 – тиск на виході; p_v – тиск насиченої пари рідини.

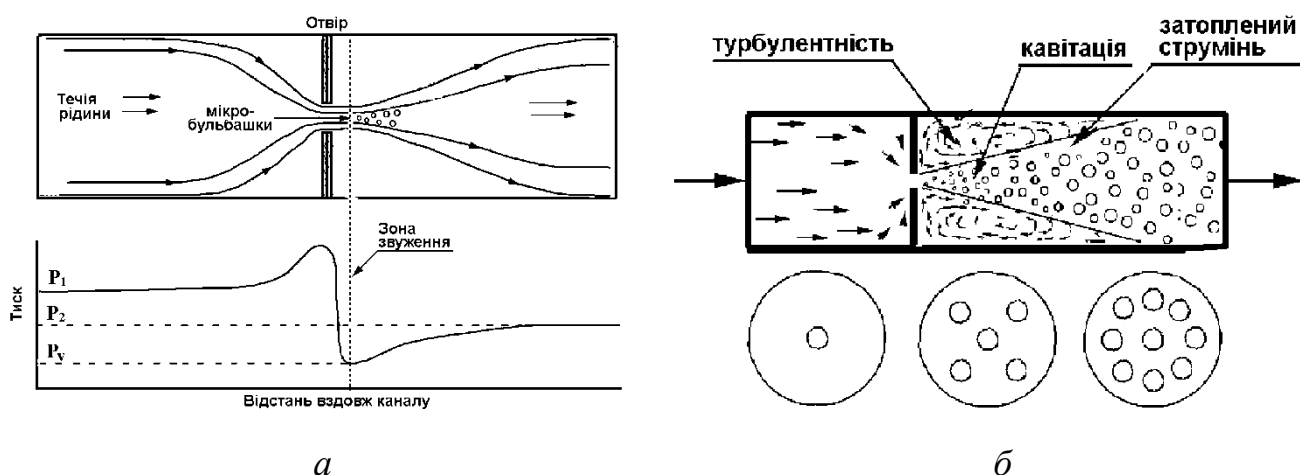


Рис. 1.7. Кавітаційний пристрій з діафрагмою: *а* – зображення діафрагми з профілем тиску(за даними [47]); *б* – ГД кавітаційний реактор типу пластинки з одним або декількома отворами.

Через раптову зміну діаметра труби градієнт тиску доволі високий і, відповідно, інтенсивність захоплення бульбашки після її виходу отвору дуже значна. При проходженні рідини через отвір відбувається відрив прикордонного шару, через що при постійному перепаді тиску втрачається занадто багато енергії. Величина падіння тиску $p_1 - p_2$, яка залежить від геометрії звуження та структури потоку сильно впливає на інтенсивність турбулентності за звуженням [173, 174].

Автори роботи [175] на основі теоретичних досліджень, проведених як з соплом Вентурі, так і з діафрагмою, встановили, що інтенсивність ГД кавітації сильно залежить від параметрів кавітуючого пристрою, насамперед, пов'язаних з ділянкою звуження. Виявилось, що падіння тиску на діафрагмі набагато вище, ніж в соплах Вентурі і, як наслідок, інтенсивність кавітації, створювана діафрагмою,

помітно перевищує інтенсивність кавітації в соплі Вентурі, що підтверджено в роботах [3, 173, 174, 176–178].

Діаметр звуження d є одним з найважливіших факторів, який суттєво впливає на виникнення кавітації. В [179] представлено експериментальні і теоретичні аспекти переходів кавітаційних режимів течії при проходженні води через отвір. Зазначено, що зі збільшенням діаметра отвору число колапсуючих бульбашок зростає приблизно лінійно. Аналогічні результати були отримані іншими дослідницькими групами [173, 180–182]. Також було виявлено, що величина акустичного тиску, створеного окремою колапсуючою бульбашкою збільшується зі збільшенням діаметра отвору [181, 183, 184]. В роботі [174] методом чисельного моделювання досліджено механізм кавітації на діафрагмі і показано, що зі збільшенням ступеня стиснення потоку інтенсивність кавітації зростає. В [175] зазначено, що товщина отвору l істотно впливає на характер кавітації. Відношення тисків, необхідне для ініціювання кавітації, змінюється в 10 разів для співвідношень товщини отвору до діаметра (l/d) в діапазоні $l/d \in 0 \div 5$.

Використання пластини з кількома отворами, схема якої представлена на рисунку 1.7 б, забезпечує кращий контроль над інтенсивністю кавітації та кількістю кавітаційних подій всередині пристрою [179, 181, 185]. Оскільки порожнини утворюються тільки по периферії отворів [67], при проектуванні кавітаційного реактора слід уявити віртуальну пластину з безліччю отворів для забезпечення більш високої інтенсивності кавітації [184]. При однаковій площі прохідного перерізу пластина з кількома отворами через більший периметр отвору створює більше кавітаційних порожнин ніж діафрагма. В [183] експериментально досліджено ГД кавітацію в одно- та багатоотвірних пластинах для оцінки їхніх гідравлічних коефіцієнтів втрат, умов початку кавітації та критерію переходу до суперкавітації. Показано перевагу багатоотвірних пластин з точки зору виміряного коефіцієнта втрат і відповідно зменшення енергетичних витрат. В роботі [181] на основі проведеного багатофакторного експериментального дослідження показано, що розміри отворів у пластині та їх форма (кругла, квадратна, прямокутна), а також

кількість отворів на пластині суттєво впливають на структуру кавітаційного поля причому інтенсивність кавітації сильно залежить від сумарної площі отворів відносно площі трубопроводу [181]. Завдяки їх геометричній різноманітності та розподілу на пластині можна спрямовано керувати умовами генерації кавітаційних областей різної структури та різного розміру бульбашок.

1.1.3.2. Кавітаційний реактор на основі сопла Вентурі

Трубки Вентурі широко використовуються і вивчаються як спосіб отримання мікробульбашок у кавітаційних процесах. Типова схема сопла Вентурі представлена на рис. 1.8.



Рис. 1.8. Гідродинамічний кавітаційний реактор типу сопла Вентурі.

Сопло Вентурі складається з послідовно розміщених секцій конфузора, горловини і дифузора, в яких динаміка потоку істотно змінюється, але не відбувається раптового стиску і розширення, як це спостерігається в діафрагмі. Сопло Вентурі може мати різні форми, такі як прямокутні, трикутні, круглі та еліптичні [3, 19, 47, 186–191], і різні розміри, починаючи від мікроканалів з гідравлічними діаметрами горловини від 50 мкм 800 мкм [49, 175, 190, 192–194] і до каналів з діаметрами горловини від 2 мм до 80 мм [22, 74, 126, 192, 195–197]. Розмір і форма секцій сопла Вентурі встановлюють свої критерії для ступеня кавітаційної дії, інтенсивності, колапсу та часу перебування бульбашок в області низького тиску.

В промислових застосуваннях трубка Вентурі перевершує діафрагму і пластини з отворами через її менше енергоспоживання і здатність генерувати більшу кількість бульбашок [47, 52, 176, 198]. В статтях [5, 10, 171, 177, 186, 195–

199] наведено результати теоретичних досліджень характеристик сопла Вентурі різної геометрії. Кут розкриття дифузора суттєво впливає на виникнення та розвиток кавітації, тоді як вплив кута розкриття конфузора і довжина горловини на ці чинники значно менший. Плавне розширення дифузора з невеликими кутами розкриття забезпечує достатньо часу для того, щоб зростаюча бульбашка достатньо довго залишалася в області низького тиску для досягнення максимального розміру до її колапсу [12, 171, 177, 200]. В роботах [3, 174, 183, 189, 201–204] визначали оптимальні значення основних геометричних параметрів сопла Вентурі – співвідношення діаметрів горловини і трубопроводу d_{thr}/d_0 та кута розкриття дифузора α_{dif} по критеріях мінімізації енерговитрат та максимізації інтенсивності кавітації. Показано, що в залежності від напрямку конкретного застосування сопла Вентурі в якості ГДКР оптимальні значення α_{dif} знаходяться в межах від 12° до 18° , а оптимальні значення d_{thr}/d_0 можуть змінюватись в інтервалі від 0,24 до 0,42.

Для посилення кавітаційних ефектів у декількох роботах застосовуються профільовані сопла Вентурі з внутрішніми конусними та іншими вставками [11, 12, 18, 47, 53, 177, 181, 192].

1.1.3.3. Ротаційні гідродинамічні кавітаційні реактори

На відміну від стаціонарних ротаційні ГДКР складаються з частин, що обертаються, ініціюючи при цьому кавітацію. Як ротаційні ГДКР в зарубіжних дослідженнях до недавнього часу використовували високошвидкісні крильчатки або інші гострі лопаті для прискорення тангенціальної швидкості рідини, як це відбувається, приміром, у відцентрових насосах [165–167, 205–207] або в лопатевих мішалках [47, 79, 101, 208]. В зарубіжних публікаціях останніх років як ротаційні ГДКР використовуються круглі диски або циліндри з численними заглибленнями або зазорами для створення кавітації [209–214]. У вітчизняних дослідженнях саме апарати такого типу, відомі як роторно-пульсаційні апарати (РПА) або роторно-імпульсні апарати (РІА), протягом останніх десятиріч застосовуються як ротаційні ГДКР [215–221].

В [210] представлена інноваційна конструкція ротаційного ГДКР що складається з двох звернених один до одного роторів зі спеціальними радіальними канавками, кожен з яких обертається в протилежному напрямку з лінійними швидкостями 26 м/с. Внаслідок протилежного руху двох зсувних шарів всередині реактора утворюється так звана зсувна кавітація [67, 222, 223].

В роботі [213] проведено комплексне дослідження механізму кавітації при взаємодії ротора і статора циліндричного ротаційного ГДКР. Застосована методика поєднує візуалізацію потоку та чисельне моделювання. Сильні зсувні напруження в зазорі між ротором і статором та вихрове кавітаційне збурення рідини в канавках сприяють високій інтенсивності кавітації. В [215] на базі нового підходу до моделювання кавітації у роторних машинах розроблено модель спрямовану на побудову нового покоління кавітаційних роторних дезінтеграторів.

В роботі [110] запропоновано унікальну конструкцію ударно-хвильового ГДКР на основі роторного апарата циліндричного типу, яка забезпечує динамічну руйнівну дію колапсуючих кавітаційних бульбашок, одночасно усуваючи ерозію обладнання. В [212] на базі створеного авторами нового ротаційного ГДКР досліджено кількість утворених бульбашок та енергію їх захлопування в залежності від режимних параметрів. Показано, що інтенсивність кавітації прямо пропорційна швидкості обертання і обернено пропорційна тиску на вході.

У монографії [217] проведено оглядовий аналіз існуючих конструкцій роторних апаратів та їх застосування для інтенсифікації масообміну та гідродинамічних процесів в газорідних середовищах. Зазначено, що пульсаційні апарати, які містять ротор та статор з каналами, є на сьогодні одним із перспективних типів ротаційних ГДКР. 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.

Ротаційні ГДКР широко використовуються в харчовій промисловості [11, 218, 224, 225], зокрема в молочній промисловості [4, 108, 212, 224, 226], за такими

напрямами як дегазація рідин [130, 227], вивільнення внутрішньоклітинних ферментів, мікробна інактивація [74, 101, 108, 113, 115] тощо.

Ротаційні ГДКР успішно застосовуються в технологіях очищення газових викидів від CO_2 , зокрема, у виробництві аміаку, при отриманні CO_2 з димових газів, утилізації шахтного газу з різною концентрацією метану [24], а також при створенні водопаливних емульсій [94, 212, 218, 228, 229] та водовугільного палива [90, 218]. У виробництві біогазу з активного мулу використання ротаційного ГДКР призводить до кращої дезінтеграції активного мулу і, відповідно, до більш високого виходу біогазу [211].

Автори роботи [86] на основі проведених досліджень наводять приклади успішного використання ротаційних апаратів при обробці нафти і дизельного палива з метою підвищення вмісту легких фракцій і зменшення вмісту сполук сірки.

Ротаційні апарати успішно застосовуються в системах водопідготовки [14, 184], в технологіях очищення стічних вод [210, 211], для опріснення та стерилізації морської води [114], для розриву міжмолекулярних зв'язків органічних забруднювачів [230], у технологічних процесах отримання фосфоліпідних наноструктур [95, 98, 220], а також в системах нейтралізації кислих конденсатів [231–233].

1.1.3.4. Лабораторні експериментальні стенди з дослідження процесів гідродинамічної кавітації

Експериментальні дослідження процесів та явищ гідродинамічної кавітації проводяться на лабораторних стендах, які обов'язково включають лінію рециркуляції, завантажувальну ємність, насос, ділянку з кавітаційним реактором, регулюючі клапани та вимірювальні прилади (манометри, ротаметри, термометри).

Для створення кавітації рідина прокачується через ці пристрої (отвір та трубку Вентурі) за допомогою насоса, номінальна потужність/продуктивність якого визначається об'ємною витратою, необхідною для конкретного застосування. Схема типового експериментального стенда, яка використовується для ініціювання

гідродинамічної кавітації, показана на рис. 1.9 *а, б*. Установа складається з резервуара – накопичувальної ємності, відцентрового насоса, кавітаційного пристрою (сопло Вентурі або діафрагма чи пластинка з отворами), манометрів, клапана регулювання потоку, термометра та витратоміра. Рідина з насоса циркулює по головній лінії, в якій розташований кавітаційний пристрій. Крім того, передбачена байпасна лінія для контролю швидкості потоку по рециркуляційній лінії.

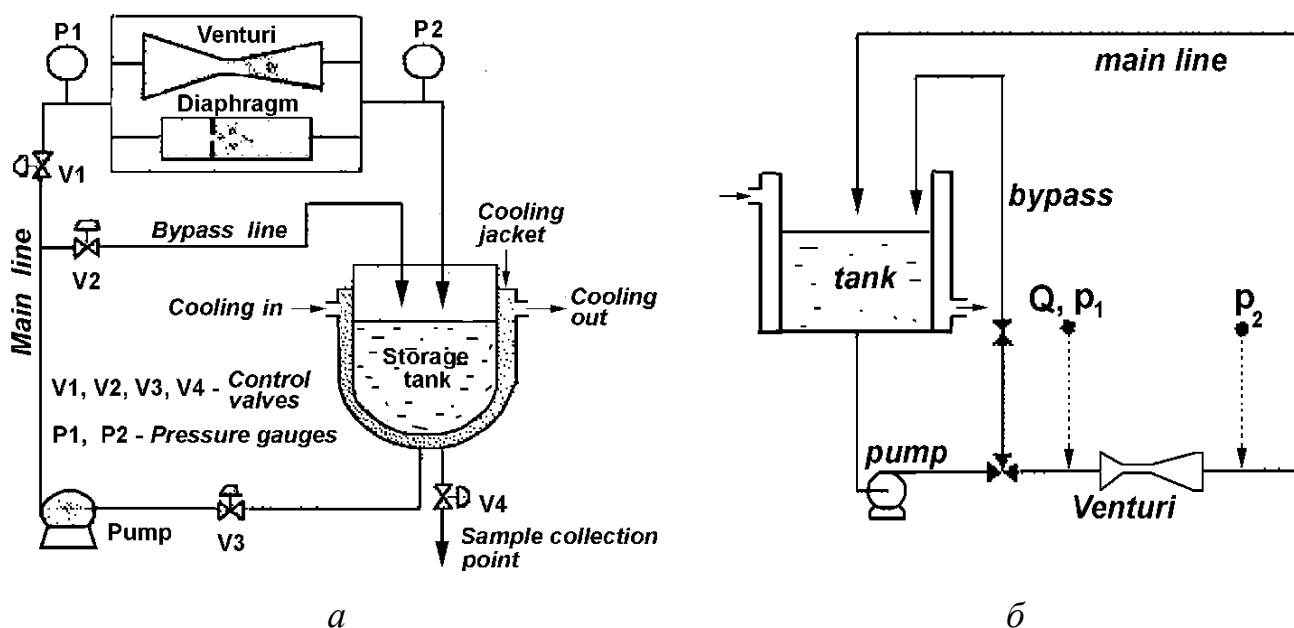


Рис. 1.9. Схеми експериментальних стендів для дослідження гідродинамічної кавітації: *а* – схема експериментального стенда з гідродинамічної кавітації (з роботи [3]); *б* – схема гідродинамічного реактора (з роботи [115]).

Лабораторний стенд такого стандартного типу застосовується для дослідження різних кавітаційних процесів, таких як очищення стічних вод, синтез наночастинок, синтез біодизельного палива, дезінфекція, дегазація рідин тощо.

1.1.4. Механізми гідродинамічної кавітації.

Механізми та ефекти гідродинамічної кавітації просто генеруються шляхом пропускання рідини через будь-яке звуження в трубопроводі. При ефективному дроселюванні тиск на ділянці звуження спадає до значень $p_l < p_{sat}(T_l)$, нижчих за тиск насиченої пари рідини, що сприяє кавітаційному (ізотермічному) закипанню

рідини і утворенню великої сукупності парогазових бульбашок. За ділянкою звуження утворенні парогазові бульбашки під дією зростаючого тиску за умови $p_l > p_{sat}(T_l)$ швидко стискаються і захлопуються. Типовий профіль тиску в рідині при її проходженні через звуження каналу показаний на рис. 1.10 а.

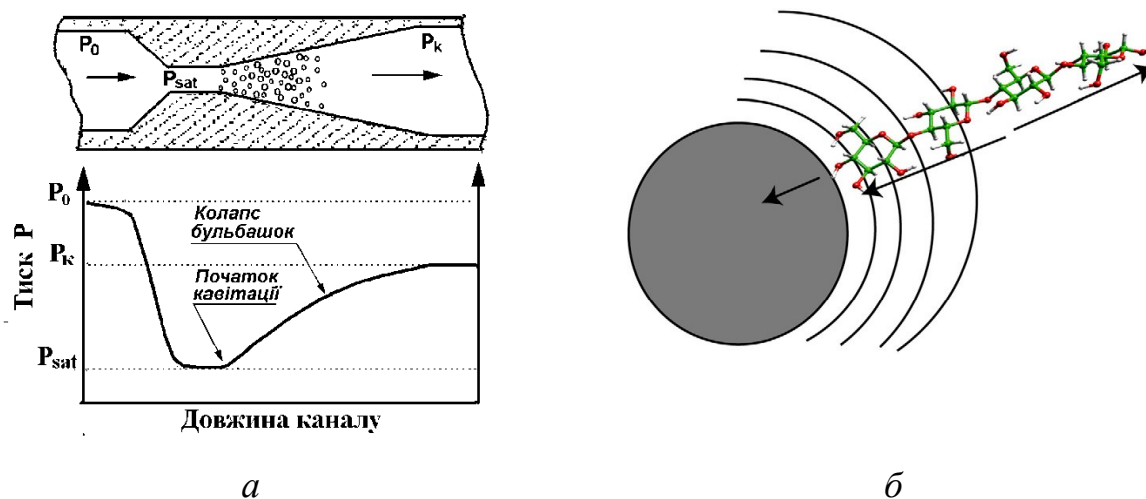


Рис. 1.10. Механізми та ефекти гідродинамічної кавітації: а – ініціювання кавітації при проходженні рідини через звуження каналу; б – динамічна дія на присутні в рідині дисперсії та супрамолекулярні структури при захлопуванні сферичної парогазової бульбашки.

Можна виділити два різновиди колапсу бульбашки: симетричний і асиметричний. Бульбашка до моменту колапсу може залишатись сферичною або несферичною (асиметричною) в залежності від того чи вона рівномірно оточена рідиною, чи знаходиться поблизу міжфазної межі «рідина-тверде тіло», приміром безпосередньо поблизу поверхні стінки труби або ємності.

1.1.4.1. Симетричний колапс

При сферичному колапсі окремої бульбашки вона випромінює в оточуючу рідину високоамплітудний сферично-симетричний акустичний імпульс тиску (рис. 1.10 б) завдяки якому створюється потужний динамічний вплив, а також ефективна хімічна і термічна дія на присутні в рідині дисперсії, субмолекулярні структури, клітини мікроорганізмів тощо. При колапсі бульбашки вивільняється велика кількість механічної енергії у вигляді сферичної ударної хвилі з потужністю,

достатньою не тільки для руйнування присутніх в рідині макро- та мікродисперсій [72, 114, 156, 234], але й для подолання енергії зв'язку в багатоатомних молекулах [76, 78, 79, 120, 234], а також для руйнування надзвичайно міцних стінок бактеріальних клітин [76, 77, 113, 120, 206]. Динамічну дію кавітаційних бульбашок треба оцінювати з урахуванням того, що в складі кавітаційного кластера одночасно зростає, стискується або захоплюється велика кількість бульбашок, внаслідок чого в міжбульбашковому просторі рідини утворюються мікротурбулентність, мікротечії, поля швидкостей, тисків і температур, які безперервно змінюються в просторі і в часі. Колективні ефекти в бульбашковому кластері, які пов'язані з силовою та термічною взаємодією сукупності бульбашок кластера є важливим стимулюючим механізмом, як в акустичній, так і в гідродинамічній кавітації.

Крім механічної дії ударної хвилі для сферичного колапсу бульбашок характерним є утворення реактивних вільних радикалів, а також термічний піроліз органічних молекул чи бактеріальних клітин. Під сумарним впливом цих трьох факторів відбувається розривання міжмолекулярних зв'язків і, як наслідок, руйнування молекул протеїнів, міцелярних структур, агрегацій, клітин мікроорганізмів. Хімічні перетворення пов'язані, по-перше, з утворенням реакційно здатних вільних радикалів молекул субстрату, зокрема гідроксильним радикалом ($\bullet\text{OH}$) і пероксильним радикалом ($\text{HO}_2\bullet$), які відіграють головну роль у реакціях окиснення [11, 35–37, 114, 182], а по-друге, через термічний розпад великих довгих молекул органічних речовин або протеїнів на більш дрібні під дією так званого «терміка», або «гарячої точки» [3, 11, 18, 59, 114, 117, 235], яка утворюється в локальній області захоплення кавітаційної бульбашки (рис. 1.11).

Ці локалізовані гарячі точки всередині кластера мають температуру більше $5000\text{ }^\circ\text{C}$, тиск порядку 1000 атмосфер, швидкість нагрівання чи охолодження 10^{10} K/s та час життя кілька мікросекунд [18, 59, 61].

Відповідно до концепції «гарячої точки» кожна бульбашка на стадії колапсу діє як мікрореактор, де на протязі дуже короткого проміжку часу (10-20 нс) створюються умови надзвичайно високого тиску і високої температури та

вивільняється велика кількість енергії. Всередині і в околиці «терміка» розглядаються три реакційні зони, які показано на рис. 1.11.

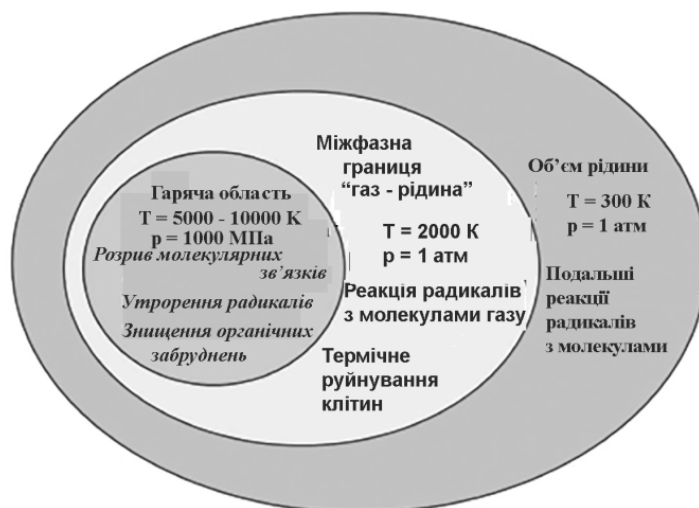


Рис. 1.11. «Гаряча точка», «термік» – це парогазова бульбашка, яка в момент свого захопування на короткий час (10-20 наносекунд) переходить у стані надкритичного флюїду (з роботи [3]).

(а) У ядрі бульбашки («гаряча точка») температура і тиск досягають найвищих пікових значень. Усередині цієї області захоплені молекули пари та газу дисоціюють на проміжні сполуки і при дисоціації виробляють реакційно здатні вільні радикали, які атакують цільові молекули органічних речовин, ініціюючи подальшу реакцію.

(b) На межі зони рідини з поверхнею гарячого ядра внаслідок затухаючих осциляцій бульбашки та її наступного колапсу створюються сильні зсувні напруження, мікрострумені і мікротурбулентність. Температура в цій зоні не перевищує 2000 K , а тиск дорівнює атмосферному тиску [18, 59]. Турбулентність посилює масоперенос утворених радикалів від межі «ядро-рідина» в об'єм рідини. Органічні молекули, які присутні в цій зоні, термічно розкладаються через високу температуру.

(с) В об'ємі рідини поблизу «терміка» тиск дорівнює атмосферному тиску, а температура близька до нормальної ($T_l \approx 300\text{ K}$). У цій низько температурній

області утворені радикали дифундують в об'єм рідини і там реагують з цільовими органічними молекулами. Враховуючи, що відстань від центра гарячого ядра до зони холодної рідини не перевищує 100 мкм, градієнти тиску і температури в зоні захоплення кавітаційної бульбашки приймають аномально високі значення.

Кількісна оцінка хімічних ефектів, з точки зору генерації радикалів $\text{OH}\cdot$ і виходу хімічної реакції, є вкрай важливою. Для визначення ефективності механізмів ГД кавітації проводяться дозиметричні дослідження з такими хімічними препаратами, як йодид калію [53, 191, 181, 236] або саліцилова кислота [237, 238] з застосуванням, відповідно, методів спектрофотометрії та рідинної хроматографії.

1.1.4.2. Асиметричний колапс

Кавітація поблизу протяжної твердої поверхні суттєво відрізняється від кавітації в об'ємі рідини, де розподіл тиску в рідині поблизу бульбашки в радіальному напрямі до її центру є сферично симетричним. У випадку кавітації бульбашки поблизу твердої стінки тиск на її поверхню з боку суцільного об'єму рідини буде перевищувати тиск на її поверхню з боку шару рідини між бульбашкою і стінкою, що спричиняє деформацію бульбашки під час її осциляції і приводить до її асиметричного колапсу. На стадії стискання бульбашки, котра знаходиться поблизу твердої поверхні, оточуюча бульбашку рідина приймає форму мікроструменя, який проходить крізь бульбашку в напрямку до твердої поверхні [239–244]. В [244] детально описано оптико-динамічний процес трансформації акумульованої в лазері енергії в механічну енергію з утворенням або симетричної ударної хвилі, або асиметричного колапсу в залежності від відстані бульбашки до поверхні. При дії кумулятивного струменя на велику тверду дисперсію можливе її руйнування, а при дії на стінку – ерозійне пошкодження її поверхні [18, 58, 230]. Мікрострумінь може досягати високих швидкостей (від 100 до 750 м/с) [18, 59, 35, 40, 241, 245] внаслідок чого створюється надзвичайно потужний кумулятивний удар з локальним тиском більше 1 ГПа і тривалістю близько 1 нс [15, 245]. Такі удари залишають на поверхні характерні тріщини, вибоїни та мікроскопічні ямки.

Дослідження кавітаційної ерозії з застосуванням високошвидкісної кіно- або відеозйомки з метою вивчення і розуміння фізики процесу проводилися багатьма науковцями в різних країнах [18, 240–245].

Типовий характер осциляції і завершальної стадії асиметричного захлопування одиночної бульбашки поблизу твердої поверхні, зареєстрованих в роботі [245] представлено на рис. 1.12.

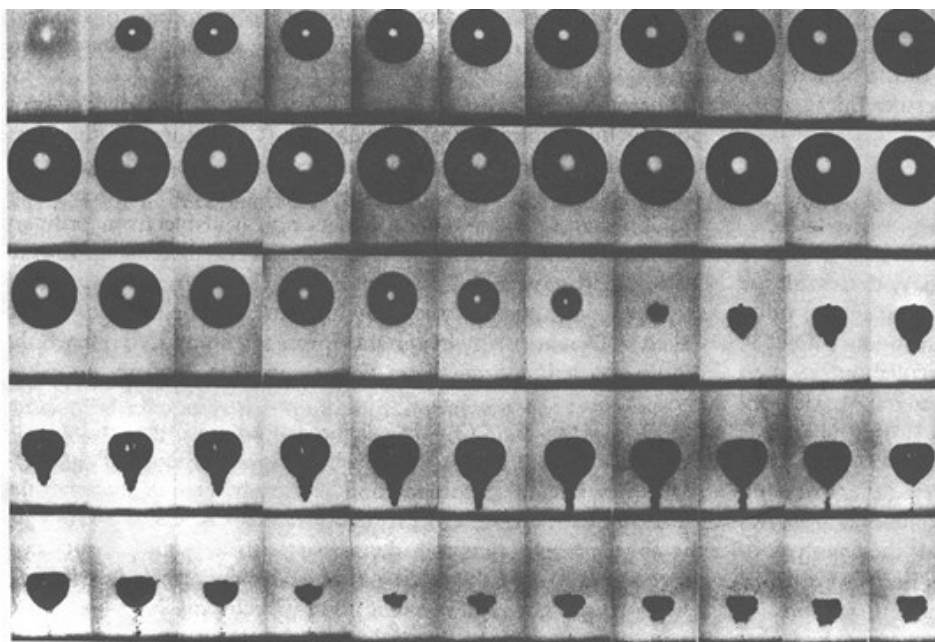


Рис. 1.12. Кавітація поблизу поверхні межі «рідина – тверде тіло».

Високошвидкісна кінематографічна послідовність лазерно-індукованої кавітації поблизу твердої поверхні, що показує формування удару мікроструменя; 75 000 кадрів за секунду (з роботи [245]).

Наведені в [245] послідовності еволюції лазерно-індукованої кавітаційної бульбашки поблизу стінки фіксувалися від початку оптичного пробою до кінцевого колапсу. З рис. 1.12 видно, що при розширенні бульбашки в процесі її затухаючої осциляції центр маси бульбашки віддаляється від стінки, а при стисненні наближається. При початковому радіусі бульбашки 3,5 мм швидкість кумулятивного мікроструменя досягає 100 м/с, а тиск удару становить близько 25 МПа [241].

В [243] аналогічні дослідження проводилися методом спалахової мікрофотографії, а в [241] використовувався метод двоекспозиційної фотографії з високою просторово-часовою роздільною здатністю.

1.1.4.3. Ерозійне руйнування твердих поверхонь

З метою оцінки кавітаційної стійкості сопел Вентурі [246], насосів і клапанів в гідравлічних системах [166, 246, 247], на гідроелектростанціях [248], в ядерній енергетиці [249] та збільшення їх експлуатаційної ефективності в цих роботах досліджено вплив різних параметрів на кавітаційну ерозію металевих поверхонь (сталі, сплави алюмінію тощо). Велика кількість робіт пов'язана з вибором стійких до кавітаційної ерозії матеріалів, композитів, сплавів та покриттів [128, 186, 208, 245, 246, 250–252]. В [250] показано, що в гідравлічному машинобудуванні, найбільш високу стійкість до кавітаційної ерозії мають конкретні, виявлені в дослідженні, марки сталевих титанових та бронзових сплавів, а в [246] як стійкий матеріал при виготовленні стійких до ерозії кавітаційних реакторів для харчової промисловості пропонується харчова сталь.

В останні роки поширилося число публікацій щодо інженерної кераміки, яка загалом вважається стійкою до корозії та кавітаційної ерозії незалежно від середовища (дистильованої та морська вода, розбавлені кислоти та луги). В роботі [251] за результатами дослідження доведено, що склокераміка на основі базальту має високу стійкість до кавітаційного зношування і може використовуватись в умовах експлуатації як заміна інших металевих матеріалів. В статті [208] проведено докладний огляд досліджень за останнє десятиріччя стосовно явища кавітаційної ерозії, а також методів захисту матеріалу від ерозійних пошкоджень.

Інтенсивність кавітаційної ерозії суттєво зменшується зі збільшенням вмісту розчиненого в рідині або захопленого рідиною газу [128, 231, 245, 248, 251, 252]. В роботах [128, 245, 251] досліджено вплив об'ємного газовмісту води на кавітаційну агресивність. При постійній швидкості потоку плавно регулювали газовміст в інтервалі від 1% до 4%. При газовмісті 4% поверхня зазнає майже в 50 разів менше пошкоджень ніж при газовмісті 1%. В статтях [208, 245, 250] показано, що агресивність кавітаційної ерозії матеріалів експоненційно спадає зі збільшенням насичення рідини газом. Захоплення повітря потоком рідини сприяє зменшенню пошкоджень поверхні, спричинених кавітаційною ерозією, за рахунок взаємодії між

кавітаційними та повітряними бульбашками. В [128] теоретично доведено, що руйнування повітряних бульбашок внаслідок такої взаємодії не тільки зменшує інтенсивність ерозійного руйнування, але й перенаправляє руйнівну енергію кавітаційних бульбашок шляхом контролю орієнтації їх мікроструменів. Ці результати встановлюють фундаментальні рекомендації щодо захисту від кавітації в гідротехнічних спорудах.

1.1.5. Моделювання процесів кавітації

Попри те, що спрямовані дослідження кавітаційних явищ проводяться вже на протязі десятиріч, природа кавітаційних ефектів та механізмів досі залишається недостатньо вивченою і зрозумілою. Причина полягає в тому, що найважливіші стадії процесу – зародження мікробульбашок та їх наступний колапс відбуваються в просторовому масштабі нанометрів, а кавітаційні процеси на цих стадіях протікають в часовому масштабі наносекунд. Проведення точних експериментальних досліджень на такому рівні пов'язано з певними труднощами, або взагалі неможливо. Сьогодні дослідження кавітаційних явищ базується, насамперед, на створенні відповідних математичних моделей, які удосконалюються та модифікуються по мірі одержання нових експериментальних результатів.

Взагалі, 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.

1.1.5.1. Модель кавітації

Вперше рівняння процесу стискання та колапсу кавітаційної бульбашки отримано і вирішено Релеєм в 1917 році. Модель Релея фактично описує замикання сферичної вакуумної порожнини в ідеальній нестисливій рідині, яка знаходиться при постійному тиску p_{∞} , без врахування поверхневого натягу рідини та наявності парогазової суміші в бульбашці. Рівняння Релея записується у вигляді

$$R \frac{d^2 R}{d\tau^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dR}{d\tau} \right)^2 = - \frac{p_\infty}{\rho_l}. \quad (1.1)$$

У наступні десятиліття в рівняння Релея було внесено послідовні модифікації з урахуванням фізичних властивостей рідини, таких як поверхневий натяг, в'язкість, тиск її насиченої пари. Було також враховано ефект присутності стороннього газу та пари розчинника всередині бульбашки. Ці розробки призвели до створення адекватної моделі динаміки кавітаційної бульбашки і, відповідно, більш точного рівняння, яке за ім'ям її творців [253–257] в зарубіжній літературі часто називають рівнянням Релея–Плесета–Нолтінга–Неппіраса–Порицького (RPNNP), котре в загальному вигляді можна записати як

$$R \frac{d^2 R}{d\tau^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dR}{d\tau} \right)^2 = \frac{p_R - p_\infty}{\rho_l}. \quad (1.2)$$

Тут $p_\infty = f(\tau)$ – тиск в рідині на великій відстані від бульбашки; $p_R = f(\tau)$ – тиск рідини на межі з поверхнею бульбашки.

Релей, прийнявши, що $p_\infty = const$, а $p_R = 0$, спростив базове рівняння (1.2) до форми (1.1), яке можна проінтегрувати і оцінити час замикання порожнини в залежності від її початкового радіусу і тиску p_∞ . Нолтінг і Неппірас [255, 256] першими розширили рівняння Релея для опису пульсації та колапсу кавітаційної бульбашки в акустичному полі, включивши в (1.2) тиск стороннього газу всередині порожнини p_g , а також вплив тиску Лапласа $2\sigma/R$ на зовнішню поверхню бульбашки. Рівняння Нолтінга–Неппіраса зазвичай записується у вигляді

$$R \frac{d^2 R}{d\tau^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dR}{d\tau} \right)^2 + \frac{1}{\rho_l} \left[p_0 + p_{ac} \sin \omega \tau + \frac{2\sigma}{R} - \left(p_g + \frac{2\sigma}{R} \right) \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma} \right] = 0, \quad (1.3)$$

де p_g – тиск стороннього газу у бульбашці; p_{ac} і ω – акустичний тиску та кругова частота УЗ поля; γ – показник політропи (для ізотермічного процесу $\gamma = 1$).

Роком пізніше Порицький [257] додав член в'язкості рідини, завдяки якому створюється додатковий тиск на поверхню бульбашки $p_\mu = 4\mu \cdot (dR/d\tau) / R$.

Плессет і Цвік [254] дослідили зростання парової бульбашки без стороннього газу в перегрітій рідині з урахуванням тиску пари p_v , поверхневого натягу σ та тепломасообміну між бульбашкою і рідиною. Показано, що швидкість зростання бульбашки сильно залежить від кінетики фазового переходу рідини – пара.

Пізніше Плессет і Проперетті [253] виконали детальний аналіз найважливіших теоретичних результатів по динаміці кавітаційних бульбашок з урахуванням попередніх модифікацій рівняння (1.2), на основі чого запропонували уніфіковане рівняння, що описує динаміку сферичної парогазової бульбашки в процесах УЗ і ГД кавітації. Це рівняння, яке є фактично рівнянням RPNP, але одержало загально прийнятну назву рівняння Релея–Плесета, зазвичай записують у вигляді

$$R \frac{d^2 R}{d\tau^2} = \frac{1}{\rho_l} \left[p_b(\tau) - p_\infty - \frac{3}{2} \left(\frac{dR}{d\tau} \right)^2 - \frac{2\sigma}{R} - \frac{4\mu}{R} \left(\frac{dR}{d\tau} \right) \right], \quad (1.4)$$

де $p_b = p_g + p_v$ – сумарний тиск газу і пари всередині бульбашки.

Диференціальне рівняння (1.4) вирішуються за двох початкових умов:

$$R(0) = R_0; \quad dR/d\tau|_{\tau=0} = 0. \quad (1.5)$$

Рівняння Релея–Плесета, однак, не враховує стисливість рідини, яка істотно впливає на радіальний рух стінки кавітаційної бульбашки до моменту її колапсу, коли швидкість стінки бульбашки $dR/d\tau$ досягає екстремально високих значень, вищих за швидкість звуку в середовищі. Найбільш помітний внесок в цьому сенсі зробили Келлер і Колодонер [258], Келлер і Міксис [259], а пізніше Проперетті з Лещі [260]. Виведення модифікованого рівняння Релея–Плесета з урахуванням стисливості рідини детально розглядається в подальших розділах дисертації.

З історії послідовних модифікацій рівняння Релея, котра налічує декілька десятків робіт з детальним аналізом відповідних рівнянь, в тому числі тих, в яких описано такі важливі фактори, як стисливість рідини, несферичність бульбашок неізотермічність процесу та інші, що не включені в рівняння Релея–Плесета, можна знайти в оглядових роботах [3, 11, 53, 63, 261, 262].

1.1.5.2. Модель гідродинаміки каналу

Розробка математичних моделей динаміки бульбашок є найважливішим компонентом ефективного проектування акустичних та гідродинамічних кавітаційних реакторів. У літературі розглядаються переважно моделі гідродинамічних кавітаційних реакторів у зв'язку з їх широким використанням в різних промислових технологіях.

Модель гідродинаміки каналу описує зміну тиску $p_l = f(\tau)$ у фіксованому елементарному об'ємі рідини за час її проходження через канали змінної геометрії. Розраховані в даній моделі значення входять в рівняння (1.4) як аналітична залежність $p_\infty = f(\tau)$, що забезпечує можливість чисельного розв'язання цього рівняння. Таким чином, залежність, розрахована для каналу з заданою геометрією, дозволяє визначити поведінку кавітаційного кластера в конкретному реакторі.

Для опису акустичної кавітації при заданих значеннях частоти f та інтенсивності p_{ac} УЗ поля періодична зміна тиску в рідині на віддалі від бульбашки описується синусоїдальною функцією $p_\infty(\tau) = p_0 + p_{ac} \cdot \sin 2\pi f\tau$.

Для кавітаційних реакторів типу сопла Вентурі або пластинки з отворами залежність $p_\infty = f(\tau)$ розраховується з використанням рівняння Бернуллі [1, 19, 175] або усередненого за Рейнольдсом рівняння Нав'є – Стокса [1, 19, 47, 261]. При необхідності, ці рівняння доповнюються рівняннями моделі турбулентності [47, 197]. Для вирішення завдань оптимізації конструктивно-режимних параметрів кавітаційних реакторів використовуються багатофазні моделі обчислювальної гідродинаміки (CFD) на основі готових програмних продуктів типу ANSYS [58, 197, 204, 205]. Особливі труднощі викликають теоретичний опис нестационарних гідродинамічних процесів в РПА, які використовують у різних технологіях як ефективні кавітаційні реактори. Це пов'язано зі складністю конструкції таких пристроїв і необхідністю враховувати вплив різноманітних чинників на оброблюване середовище [3, 4]. Слід зазначити, що масова витрата двофазного киплячого потоку через будь-який кавітаційний реактор періодично змінюється з часом, що визначає специфіку моделювання кавітаційного потоку.

1.2. Аналіз сучасного стану методів дегазації рідини

Технологічні операції дегазації (деаерації) рідини застосовується в різних галузях промисловості – хімічній, харчовій, нафтопереробній, енергетиці, в процесах водопідготовки, очищенні стічних вод та інших. Термін “деаерація” відносяться до очищення рідини від присутніх в ній газів, котрі входять до складу повітря. Термін “дегазація” має більш широке значення і відноситься до видалення з рідини будь-яких вільних або розчинених в ній газів, спрямоване, насамперед, на видалення небажаного газу, особливо агресивних газів, таких як кисень або діоксид вуглецю, сірководень. У промисловому виробництві дегазація є необхідним технологічним етапом процесу обробки для забезпечення стабільності продукту, його якості та вимог стандарту. Подача води з низьким вмістом розчинених газів призводить до збільшення терміну служби обладнання, скорочення витрат на технічне обслуговування та підвищення якості процесу.

У багатьох процесах, в яких використовується вода, бажано, щоб вміст розчиненого повітря або кисню у воді був нижчим, ніж вміст, виявлений у воді, що надходить з муніципальної лінії подачі. Це особливо стосується процесів, у яких вода використовується під час виробництва напоїв. Розчинене повітря або кисень сприяють небажаному піноутворенню, погіршенню смаку або заважають розчиненню вуглекислого газу у воді під час виробництва газованих напоїв.

Деаерація в промисловості з виробництва безалкогольних напоїв зазвичай використовує діоксид вуглецю як газ для десорбції повітря. Це має перевагу в тому, що CO_2 , який витісняє з води повітря, одночасно поглинається водою, тобто просто входить у газований продукт. Щоб досягти бажаної десорбції, деаератор повинен працювати при низькому тиску (вакуум). При цьому видалення повітря полегшується, але утруднено поглинання діоксиду вуглецю, що приводить до його значних втрат. Сучасні системи деаерації використовують велику кількість газу, тепла, вакууму або їх комбінації для видалення повітря з води. Зазвичай застосовані в харчовій промисловості поточні установки або витрачають для деаерації великі кількості CO_2 або використовують в деаераторі вакуумні насоси. Перший варіант є

дорогим з точки зору сировини (CO_2), а другий – дорогим з точки зору витрати енергії, обслуговування та низької продуктивності.

Отже, зберігається потреба у розробленні і впровадженні у промисловість інноваційних методів дегазації рідин, більш продуктивних і більш ефективних, ніж існуючі на сьогодні традиційні методи.

1.2.1. Традиційні методи дегазації рідин

До традиційних методів дегазації (деаерації) зазвичай відносять хімічні, фізичні та механічні методи.

При дегазації рідин хімічним методом застосовують реагенти, що зв'язують розчинені у рідині гази.

Фізичні методи дегазації рідин базуються на законі Генрі та створенні умов, за яких розчинність газу в рідині близька до нуля, наприклад шляхом нагрівання, вакуумування або відстоювання

Механічні методи дегазації працюють за принципом механічного поділу газорідинної суміші на рідинну та газову фази.

Хімічні методи дегазації. Хімічні методи дегазації використовуються насамперед для очищення від небажаних агресивних газів технічної води, для її пом'якшення та стабілізації, а також для нейтралізації діоксиду вуглецю в кислих конденсатах. \ Однак застосування хімічних методів дегазації в харчовій промисловості не прийнятне в першу чергу через їх екологічну небезпечність.

Недоліки використання хімічних методів дегазації пов'язані, насамперед з надмірно високими матеріальними витратами та необхідністю застосовувати дорогі і екологічно шкідливі реагенти.

До **фізичні методів дегазації** відносять термічні та вакуумні способи. В деяких випадках застосовуються також електромагнітні способи [263]. Фізична дегазація рідин базується на виконанні закону Генрі і створенні умов, при яких розчинність газу в рідині зменшується за рахунок нагрівання, вакуумування або відстоювання. До фізичних методів дегазації формально можна віднести також і

кавітаційні методи, але, оскільки вони до останнього часу практично не знаходили застосування в промисловості, в дисертації вони, на противагу традиційним методам, розглядаються як інноваційні методи дегазації.

Термічна дегазація базується на тому, що розчинність газів у рідині значною мірою залежить від температури і тиску. Зі зростанням температури розчинність газів відповідно до закону Генрі знижується – при 100 °С вода практично вільна від кисню та вуглекислоти. При нагріванні до кипіння вода повністю дегазується, причому нагрівання води найбільше доцільно проводити перегрітою парою. Цей метод на практиці застосовується, коли вода і так нагрівається понад 100 °С (дегазація живильної води для парових котлів). Ефективність дегазації залежить від багатьох технічних деталей. Відповідні витрати пропорційні до необхідного ефекту дегазації, який, у свою чергу, визначається величиною тиску в паровому котлі або інструкціями до живильної води для котлів.

Термічний спосіб набув найбільшого поширення в парових і водогрійних котельнях. Умовою видалення газів з гарячої води є перебування її протягом достатнього часу в дрібнодисперсному стані при температурі кипіння, під тиском, при якому розчинені гази переходять у вільний стан всередину парогазових бульбашок, що вільно виділяються в газоподібну фазу. При відкритому нагрівачі поживної води деаератор, при нагріванні до 88-93 °С і відведенні газів в атмосферу, знижує концентрацію кисню приблизно до 0,3 мл/дм³.

Вакуумні способи дегазації найчастіше базуються на розпиленні рідини з розчиненими агресивними газами (O₂, CO₂, H₂S) під вакуумом при невисокій її температурі (рис. 1.13), оскільки зменшує енерговитрати на нагрівання рідини за рахунок витрат на її вакуумування. Якщо задача дегазації полягає у видаленні з рідини конкретного агресивного газу (наприклад, сірководню) то розпилення рідини проводиться в газовому середовищі, в якому парціальна концентрація цього шкідливого газу нехтовно мала, наприклад в атмосфері азоту [29].

Альтернативою є видалення з рідини небажаного газу (того ж сірководню) шляхом барботування забрудненої рідини азотом або повітрям, у якому парціальний

тиск цього газу близький до нуля. Принцип цього методу схематично зображено на (рис. 1.14).

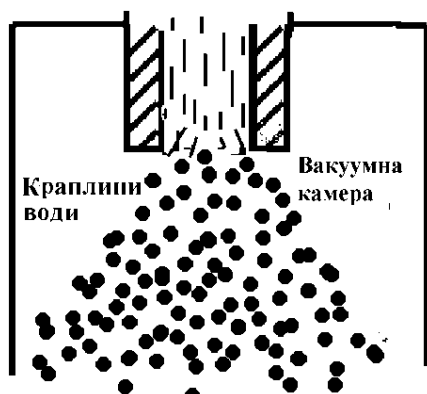


Рис. 1.13. Дегазація забрудненої рідини шляхом розпилювання її в резервуарі під вакуумом.

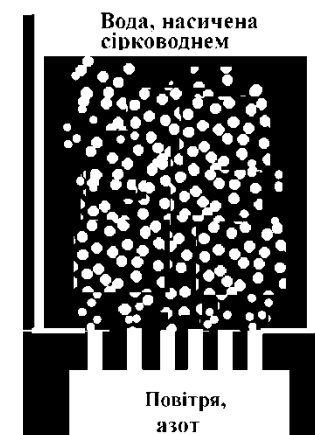


Рис. 1.14. Дегазація забрудненої рідини шляхом барботування азотом чи повітрям через деаераційну колону.

Ці методи є компромісними стосовно термічних методів дегазації.

Недоліки термічних та вакуумних методів дегазації (деаерації) рідини.

Термічні та вакуумні методи деаерації рідини мають свої недоліки. Вони досить енерговитратні, малопродуктивні і потребують надмірно довгого часу для видалення газу з рідини.

Термічна деаерація вимагає значних витрат енергії на нагрівання води, може призводити до як термічної деградації термолабільних сумішей (через нагрівання), так і до утворення накипу на поверхнях ємностей або трубопроводів.

Вакуумні методи деаерації, у свою чергу, схильні до ризику підсмоктування повітря через нещільності в устаткуванні, що знижує ефективність деаерації і може навіть збільшити концентрацію кисню у воді.

Механічні методи дегазації працюють за принципом механічного поділу газорідинної суміші на рідинну та газову фази шляхом сепарації та фільтрації. До таких методів відносяться відцентровий та мембранний методи.

Відцентрові методи дегазації рідин засновані на використанні відцентрової сили для поділу газових бульбашок та рідини з застосуванням відцентрових дегазаторів, які створюють вихровий потік, що спрямовує утворені газові

бульбашки до центру, де вони видаляються з рідини. Відцентрові дегазатори використовуються переважно у бурінні нафтових та газових свердловин для видалення з бурового розчину вуглекислого газу та сірководню з метою запобігання утворенню газових пробок, які можуть призвести до аварій та зупинки робіт.

Мембранна дегазація є доволі ефективним і продуктивним методом видалення з питної та технічної води небажаних газів. В методах мембранної дегазації застосовується пристрій, відомий як мембранний дегазаційний блок, в якому використовується газопроникна мембрана, зазвичай у поєднанні з вакуумом або потоком газу (наприклад, азотом), для вилучення небажаних газів з рідини.

В поєднанні з вакуумним насосом мембранна дегазація в при використанні чистого повітря для дегазації дозволяє довести вміст вуглекислого газу воді до 1 мкг/л (ppb), а при використанні промислового азоту як дегазуючого середовища зменшити вміст кисню у воді до залишкових значень менше 1 мкг/л (ppb) [265]. Застосування методу мембранної операції анаеробного очищення стічних вод дозволило збільшити ефективність видалення кисню до 90%, тоді як вакуумна технологія забезпечує лише 83% [266].

Для усунення бактеріального забруднення при виробництва надчистої води бактерії знищуються шляхом окислення за допомогою H_2O_2 , O_3 та/або УФ випромінювання. Для повного видалення з очищеної води побічних продуктів окислення, таких як CO_2 , O_2 тощо, використовується мембранна дегазація [267].

Переваги мембранної дегазації включають покращення якості води, високу ефективність процесу та вищу продуктивність обладнання для очищення.

Недоліки методів мембранної дегазації рідин полягають у високій вартості мембрани, яка становить більшу частину загальної вартості обладнання, і надмірно високому енергоспоживанні; швидке забруднення мембрани впливає на якість води під час її обробки, а також обмежує стабільну продуктивність обробки і зменшує дебіт води.

Традиційні методи вилучення з рідини агресивних газів, котрі базуються відповідно на нагріванні рідини або її вакуумуванні, занадто енерговитратні та

малопродуктивні. В останні десятиліття широкого застосування набувають *кавітаційні методи дегазації*, які сьогодні практично замінили в промисловості традиційні методи.

Попри поширене застосування традиційних хімічних та фізичних методів дегазації в останні роки у різних галузях промисловості і енергетики все більше уваги з боку науковців та спеціалістів приділяється можливості і перевагам застосування методів кавітаційної дегазації рідин.

Рідини містять певну кількість розчиненого газу. Концентрація газу залежить від таких факторів, як температура, тиск навколишнього середовища, інтенсивність перемішування рідини. Кавітаційну дегазацію води можна позиціонувати як усунення розчинених в ній газів, а також видалення газів, що утворилися в результаті її обробки. Концентрація розчиненого повітря в воді при нормальних умовах варіюється від 8 до 14 %об. [186]. При рівновазі з повітрям водні розчини містять значну кількість газів, що вступають в складні взаємодії між собою і з молекулами домішок. Наявність нерозчинених газів (повітря) у складі парогазових бульбашок в робочій рідині знижує її об'ємний модуль пружності. Зазвичай вміст такого повітря в гідросистемах становить 0,5-5%, але іноді може досягати 15%, що створює проблеми з ефективністю гідросистеми та її надійністю [169]. Через повільне розчинення присутні у воді газові бульбашки протягом тривалого часу суттєво впливають на продуктивність гідравлічних систем [15, 191, 268, 269].

1.2.2. Акустична дегазація

Акустична дегазація є високоефективною альтернативою традиційним методам дегазації рідин, які включають кип'ятіння, зниження тиску до вакууму або барботування інертними газами. Ці традиційні методи дегазації часто мають такі недоліки, як термічна деградація (через нагрівання), тривала та енергоємна обробка та/або недостатнє видалення газу [32]. Ефективність методів акустичної дегазації з застосуванням височастотних УЗ генераторів базується в першу чергу на їх здатності забезпечити швидке видалення з рідини саме вільного газу, що міститься в

газових бульбашках. Механізми акустичної дегазації, їх теоретичне обґрунтування і приклади їх практичного застосування детально розглянуті в фундаментальних публікаціях [29, 32–34, 36, 45, 46, 270].

Комплексні дослідження акустичної дегазації рідин ведуться з другої половини минулого століття. Результати експериментів підтверджують можливість вилучення з рідини розчинених в ній нейтральних газів під дією ультразвуку, але фізичний механізм цього явища не знаходив належного пояснення. Однозначну відповідь було дано в фундаментальних роботах Л. Розеберга [271] та О. Капустіної [272]. На підставі теоретичного аналізу відомих на той час експериментів (як власних, так і інших авторів) ними було доведено, що центрами дегазації є стабільні газові бульбашки, які початково містяться в рідині, а також обґрунтовано існування двох основних механізмів вилучення газу з рідини, а саме:

- 1) випрямлена дифузія розчиненого газу з рідини в пульсуючі бульбашки;
- 2) зближення і злиття пульсуючих бульбашок під дією сили Б'єркнеса та подальше спливання утворених великих бульбашок на поверхню рідини.

Ефект випрямленої дифузії полягає в тому, що вихід газу з пульсуючої бульбашки на стадії її стиснення менший ніж надходження газу з рідини всередину бульбашки на стадії її розширення [273]. В процесі тривалої осциляції бульбашки під дією УЗ поля значна частка розчиненого газу переходить всередину бульбашок, які поступово насичуються газом, збільшують свій об'єм і спливають на поверхню рідини. L. Crum [274] першим провів детальне експериментальне дослідження зростання одиночної бульбашки в акустичному полі за рахунок випрямленої дифузії за різних умов УЗ опромінювання води.

На відміну від великого числа публікацій, присвячених теоретичному дослідженню процесів випрямленої дифузії [32–34, 273], кількість експериментальних досліджень дуже обмежена. Крім базової роботи [274] слід зазначити дві роботи [275, 276], у яких для точної реєстрації зростання одиночної бульбашки в полі стоячої хвилі використовувався стробоскопічний метод.

В результаті комплексних досліджень встановлено, що швидкість зростання бульбашок за рахунок випрямленої дифузії суттєво залежить від різних факторів, таких як розмір бульбашки, концентрація газу в рідині, акустичний тиск і частота УЗ поля [5,31-33,36,37], а також від присутності в рідині ПАР та/або розчинних неорганічних і органічних компонентів [43, 273, 274, 278].

Ефект Б'єркнеса. Одночасно з ефектом випрямленої дифузії в рідині під дією УЗ поля реалізується інший механізм, який сприяє збільшенню об'єму бульбашок. При достатньо високій концентрації газових бульбашок дегазація рідини в УЗ полі відбувається також за рахунок їх коалесценції. Між парою сусідніх пульсуючих бульбашок виникає так звана вторинна сила Б'єркнеса, пропорційна добутку їх радіусів та швидкості пульсацій і обернено пропорційна поточній відстані між ними. Якщо бульбашки пульсують в одній фазі, то під дією поля вони з наростаючою швидкістю зближаються і нарешті зливаються [11, 27, 31, 32, 279]. Утворені бульбашки швидко спливають і виходять з рідини. Перше експериментальне підтвердження зближення та коагуляції двох бульбашок однакового діаметру (180 мкм), осцилюючих в полі з частотою 10,8 кГц, було опубліковано в роботі [280].

Коалесценція бульбашок забезпечує суттєво швидший шлях збільшення їх об'єму в порівнянні зі швидкістю випрямленої дифузії [281]. Останнім часом з'явилася велика кількість експериментальних досліджень по взаємодії пари бульбашок в УЗ полі під дією сили Б'єркнеса в широкому інтервалі розміру бульбашок, частоти і акустичного тиску. Докладний огляд цих робіт міститься у публікаціях [279, 280, 282, 283]. У роботі [284] вперше встановлено, що дві пульсуючі бульбашки однакового радіусу R_0 зближаються в точній відповідності до закону Б'єркнеса лише за умови, що їх радіус R_0 перевищує певне граничне значення $R^* = f(f_{ac}, p_{ac})$. Якщо $R_0 < R^*$, то бульбашки розходяться. Пізніше наявність такого ефекту підтверджено в експериментах [32, 281].

У роботі здобувача з співавторами [46] на основі математичної моделі [7] проведено чисельне дослідження осциляції в акустичному полі пари бульбашок суттєво різного радіусу ($R_{01} > R_{02}$). Обчислювальний експеримент, проведений для

п'яти пар бульбашок з різним R_{01} і R_{02} при різних значеннях параметрів поля f_{ac} та p_{ac} показав, що бульбашки зближаються і зливаються за умови $(R_{01} - R_{02})/2 > R^*$ або розходяться, якщо $(R_{01} - R_{02})/2 < R^*$. Тут $R^* = f(f_{ac}, p_{ac})$ – граничний радіус, визначений з роботи [284]. Вперше визначено критерій переходу пульсуючих в УЗ полі двох різних за розміром бульбашок від режиму їх сходження до режиму їх розбіжності. Одержаний результат є певний внеском в розуміння процесів акустичної кавітації, зокрема механізму акустичної дегазації рідини.

На сьогодні результати досліджень з акустичної дегазації аналізуються з точки зору з'ясування ролі кожного з цих двох факторів – ефекту випрямленої дифузії [275] та ефекту Б'єркнеса [222, 279, 283].

Застосування методів акустичної дегазації. Акустичні методи дозволяють порівняно швидко і цілеспрямовано провести процес дегазації для будь-якої рідини з будь-яким газом. Завдяки цьому вони застосовуються насамперед в лабораторних дослідженнях з метою вивчення і розуміння механізмів дегазації і можливості їх практичного застосування.

В роботах [33, 34, 285, 286] розглядається застосування методів УЗ кавітації для дегазації металевих розплавів в ливарному виробництві, зокрема для вилучення водню з алюмінієвих сплавів. Статті [31, 287] присвячені використанню ультразвуку для дегазації бурових розчинів та проб сирої нафти. В результаті досліджень зроблено висновок, що УЗ дегазія є концептуально ефективним та екологічно безпечним засобом видалення газів з бурових розчинів та з зразків сирої нафти без зміни їх хімічного складу. В роботах [269, 287, 288] наводяться результати експериментальних досліджень по акустичній дегазації гідравлічної та моторної олів для підвищення об'ємного модуля пружності цих рідин і, як наслідок, жорсткості гідравлічних систем. В [26, 101, 105] обговорюються застосування методів УЗ дегазації в харчовій промисловості або біопереробці, зокрема для деаерації і дезодорації молочних продуктів та овочевих і фруктових соків.

За минулі півстоліття після публікації базових робіт з акустичної дегазації [271, 272] у рамках наступних досліджень накопичено великий обсяг нової корисної

інформації в галузі фізики рідин, зокрема води. Певні успіхи досягнуто у сфері вивчення стану та поведінки у воді нанорозмірних газових дисперсій, природи їх незвичайної стабільності та довгоживучості. Водночас у ході проведених досліджень виявлено низку несподіваних аспектів, які суттєво ускладнюють розуміння природи та механізмів такої поведінки нанобульбашок [24, 54, 75, 77, 79, 281]. Ще в роботах О. Капустіної [272] було зазначено, що в процесі акустичної дегазації досягається граничний рівноважний рівень розчиненого газу – 70-50% від насиченого, величина якого, за даними [272], не залежить ні від частоти, ні від інтенсивності, ні від тривалості дії УЗ поля. Наявність граничної рівноважної концентрації, так званої “псевдорівноваги”, підтверджується результатами експериментів, виконаних за останні десятиліття [31–33, 286, 287]. Деякі дослідники пояснюють це існуванням конкуруючих процесів регазації, які протидіють видаленню газів, головним чином, за рахунок дифузії газу з атмосфери через вільну поверхню рідини [31, 33].

На думку багатьох авторів публікацій останніх років, у нас ще недостатньо знань, щоб зрозуміти все різноманіття динаміки бульбашок, що залежить від частоти та інтенсивності звуку [24, 32, 37]. Досі незрозумілим залишається механізм впливу самих бульбашок на характер і еволюцію УЗ поля, оскільки бульбашки сильно послаблюють ультразвук, а густина розподілу бульбашок за розмірами постійно змінюється в часі за рахунок їх фрагментації, злиття та розчинення. [44]. Через неконтрольовану зміну структури води виникає проблема поганого відтворення експериментальних результатів [33, 44, 264, 286].

Основні сучасні проблеми кавітаційної акустичної дегазації рідини детально розглянуто в роботах [36, 44–46, 270, 282].

1.2.3. Кавітаційна гідродинамічна дегазація рідини

Використання будь-яких кавітаційних методів дегазації рідини базується на тому, що присутні в рідині гази перебувають не тільки в розчиненому стані, але також у вигляді вільного газу всередині мікробульбашок, стабільно присутніх в

будь-якій рідині [1, 3, 11, 62, 271, 272, 289]. Як і в акустичній дегазації, методи ГД кавітаційної дегазації орієнтовані на видалення з рідини бульбашок, котрі разом з насиченою парою містять неконденсований газ.

Відмінність полягає в тому, що, як зазначено вище, в процесах акустичної дегазації розчинені в рідині гази під дією УЗ осциляцій в докавітаційному режимі переходять у вільний стан всередину бульбашок за рахунок тривалого процесу спрямованої дифузії. Одночасно, утворені бульбашки зі збільшеним вмістом газу, завдяки ефекту Б'єркнеса, зближаються, коагулюють, зростають у розмірі, швидко спливають і виходять з рідини.

Процеси ГД кавітації базуються на інших механізмах. У відстояній рідині з заданими значеннями температури T_0 і тиску p_{l0} стабільно перебуває у термодинамічній рівновазі з рідиною певна кількість парогазових мікробульбашок різного розміру за умови, що їх діаметри не перевищують 3-5 мкм, оскільки бульбашки більшого розміру швидко спливають і виходять з рідини [127, 186, 290].

Задача ГД дегазації полягає в тому, щоб при одноразовому скиданні тиску в рідині до значень $p_l \ll p_{sat}(T_0)$ «активувати» по можливості максимальне число цих мікробульбашок-зародків, а утворені великі парогазові бульбашки швидко вивести з рідини, приміром шляхом їх спливання, ще до початку їх стиснення і наступного колапсу. За цієї умови рідина до моменту виходу з неї бульбашок повинна перебувати під низьким тиском $p_{sat}(T_0) \leq p_l < p_{l0}$, що забезпечує видалення з рідини газу, який містився в активованих бульбашках.

Активация газових мікрозародків. Рівновага парогазової бульбашки з рідиною тотожна рівновазі тиску по обидва боки межі розділу фаз, що вимагає виконання наступної умови [12, 15, 62, 53, 81]:

$$p_{g0} + p_{sat}(T_0) = p_{l0} + 2\sigma/R_0, \quad (1.6)$$

де p_{g0} тиск газу в бульбашці; $p_{sat}(T_0)$ – тиск насиченої пари; p_{l0} – тиск рідини; $2\sigma/R$ – капілярний тиск; σ – поверхневий натяг рідини; R_0 – радіус бульбашки.

В процесі ізотермічного скидання тиску бульбашка з початковим радіусом R_0 поступово зростатиме. При цьому маса газу в бульбашці m_g і тиск насиченої пари залишаються незмінними, тиск газу p_g зменшується обернено пропорційно поточному об'єму бульбашки, а капілярний тиск $2\sigma/R_0$ зменшується обернено пропорційно її поточному радіусу. В момент, коли в процесі скидання тиску ліва частина рівняння (1.6) стане перевищувати праву, відбувається «активація» бульбашки – починається її необмежено розширення незалежно від подальшого скидання тиску в рідині [2, 84, 290–292]. До моменту активації бульбашки з початковим радіусом R_0 її радіус досягає критичного значення $R_{cr} = f(R_0)$, а спадаючий тиск в рідині досягає критичного значення $p_{cr} = f(R_0)$. Усі присутні в рідині бульбашки з радіусами $R_i < R_{cr}$ продовжують перебувати в стабільній рівновазі з рідиною, тоді як бульбашки з радіусами $R_i \geq R_{cr}$ активуються і стають нестабільними.

Величини R_{cr} і p_{cr} вперше були визначені і представлені у вигляді простих формул в 1949 році Ф. Блейком [293] стосовно дослідження механізму спрямованої дифузії в УЗ полі. В подальших публікаціях інших авторів формули для R_{cr} і p_{cr} , представлені в роботі [293], за традицією називають порогом (критерієм) кавітації Блейка. Процедура виведення формул критичного тиску та критичного радіуса при скиданні тиску в рідині в процесах кавітації наведено в роботі [1] з посиланням на публікацію Ф.Блейка як автора цих формул.

Для бульбашки із заданою масою газу m_g критичний радіус (пороговий радіус Блейка) визначається за формулою

$$R_{cr} = \sqrt{\frac{9m_g T_0 \tilde{R}}{8\pi\sigma}}, \quad (1.7)$$

а критичний тиск (пороговий тиск Блейка) – за формулою

$$p_{\infty cr} = p_v - \frac{4\sigma}{3} \sqrt{\frac{8\pi\sigma}{9m_g T_0 \tilde{R}}}, \quad (1.8)$$

де $\tilde{R}$ – газова стала.

Механізм активації бульбашки на стадії спадання тиску в рідині в рівній мірі виконується як в процесах акустичної [1, 36, 46, 294], так і в процесах ГД кавітації [176–178, 197, 290], а рівняння для розрахунку критичного тиску і критичного радіуса мають входити в систему рівнянь застосованої математичної моделі кавітації. На думку авторів [58, 290], хоча такий підхід дає прийнятні якісні та кількісні результати, однак він все ще потребує вдосконалення.

В обох випадках ефективність методу зростає при дегазації пересичених рідин, у яких вміст газу при даному тиску та температурі рідини відповідно до закону Генрі перевищує поріг його розчинності. Якщо з якихось причин (збільшення температури рідини або зменшення її тиску) рівновага порушується, розчинений газ відносно швидко переходить усередину бульбашок – за рахунок розвиненої поверхні контакту фаз [264, 273, 290]. Утворені парогазові бульбашки поступово спливають і через відносно тривалий час спливання поступово зростають, в тому числі за рахунок асоціації контактуючих бульбашок. При досягненні поверхні рідини сукупність бульбашок початково різного розміру стає практично монодисперсною, що дозволяє пов'язати розмір спливаючих бульбашок з концентрацією газу в рідині [126, 127, 290].

Кількість розчиненого газу впливає на швидкість утворення бульбашок. Зі збільшенням концентрації розчиненого газу швидкість нуклеації зростає [58, 198].

1.2.4. Експериментальні дослідження з гідродинамічної кавітаційної дегазації

Явища ГД кавітації виникають у гідравлічних системах, де потік рідини проходить через місцеве звуження з подальшим розширенням, наприклад, у запірних і регулюючих органах, діафрагмах та ін. У лабораторних дослідженнях зазвичай переважно використовуються сопла Вентурі або діафрагми з одним чи кількома отворами, в деяких випадках ротаційні апарати або насоси. Ці ж пристрої застосовуються і для вивчення механізму дегазації рідин у кавітаційних течіях.

У зоні звуження потоку, де виконується умова $v_{thr} < p_{sat}(T_l)$ відбувається інтенсивне зростання парогазових бульбашок, які необхідно потім вилучити з рідини, уникнувши при цьому можливого колапсу бульбашок на другій стадії процесу кавітації. Для цього потік, що закипає після проходження через ГДКР, подається у формі факела розпику у вакуумну ємність, в якій підтримується постійний заданий тиск $p_{vac} > p_{sat}(T_l)$ і відбувається розподіл фаз. Пара разом з газами за допомогою вакуум-насоса відводиться з ємності, а деаерована рідина за допомогою відцентрового насоса повертається в камеру завантаження.

Альтернативою цьому способу дегазації є проходження потоку рідини через стаціонарний ГДКР при високому перепаді тиску на вході і виході з реактора $\Delta p = p_1 - p_2$ (порядку 10 МПа) і доволі високому протитиску $p_2 \propto 0,1$ МПа. За рахунок високого тиску на вході p_1 в зоні звуження активується велика кількість газових мікрозародків, які зростають і після виходу з отвору швидко захлопуються. За час колапсу бульбашок пара конденсується, а рідина, що містить лише газові бульбашки, рухається у вигляді кавітаційного струменя вздовж каналу до виходу з реактора. В процесі переміщення газові бульбашки коагулюють, зливаються, зростають у розмірі і після переходу з потоком у ємність з рідиною поступово спливають і виходять з рідини. В даному методі в якості ГДКР найчастіше застосовуються довгі канали з діафрагмою на вході і на виході.

Обидва методи застосовуються сьогодні в лабораторних дослідженнях з метою їх практичного впровадження в різні галузі промисловості, де дегазація рідини є важливою нагальною проблемою, або для вивчення і розуміння впливу присутності розчинених і нерозчинених газів на механізми кавітації.

На сьогодні ГД методи дегазації ще не набули широкого впровадження в промисловість. У деяких випадках вони використовуються як гібридні технології з застосуванням традиційних термічних, вакуумних або хімічних методів дегазації.

Спрямовані експериментальні дослідження ГД кавітаційної дегазації рідин в наукових лабораторіях різних країн розпочалися приблизно з 2015 року [47].

В останнє десятиріччя опубліковано велику кількість наукових статей щодо експериментальних та теоретичних дослідженнях процесів ГД кавітаційної дегазації [11, 14, 19, 20, 68, 86, 115, 126, 145, 176, 178, 186, 197, 223, 264, 268, 295], випущено патенти на спосіб та на конструкцію кавітаційних дегазаторів [296–302]. Аналіз цих публікацій свідчить про відсутність загальноприйнятих чітких уявлень про фізичну природу та механізми кавітаційних явищ, що перебігають на мікрорівні, та загального підходу до аналізу отриманих результатів.

Далі розглядаються основні напрями експериментальних досліджень ГД кавітації рідин.

1.2.4.1. Зниження газового фактора в гідравлічних рідинах

Проблема зниження газового фактора в гідравлічних рідинах є актуальною для багатьох галузей промисловості (енергетичної, хімічної, нафтової, машинобудівної, авіаційної та інших), в яких рідини (найчастіше мінерального та моторного мастила) використовуються як робоче тіло для ведення різних процесів.

Наявність в мастилі нерозчиненого повітря впливає на його стисливість, що призводить до зниження модуля об'ємної пружності мастила та зменшення жорсткості гідравлічної системи [128, 169, 268, 269, 303–319].

Нерозчинене повітря, на відміну від розчиненого, знижує об'ємний модуль пружності робочої рідини. Зазвичай вміст такого повітря в гідросистемах становить 0,5-5%, але ця величина може досягати 15% [169, 304]. Коли на вході в насос тиск спадає при забрудненні фільтра відбувається утворення бульбашок і підвищення вмісту нерозчиненого повітря у робочій рідині. В результаті об'ємний модуль пружності робочої рідини знижується. Бульбашки повітря, що не розчинилися, стають зародками кавітаційних явищ з їх руйнівною дією. Нерозчинене повітря, окрім того, прискорює процес старіння мастила у гідравлічних системах [169, 304].

Спостерігалася взаємодія між УЗ та ГД кавітацією. Індукція УЗ кавітації в баку дегазує мастило, а дегазоване мастило, що подається в насос, зменшує ГД кавітацію у внутрішніх каналах і зазорах та вірогідність ерозії. Встановлено, що з

розчиненого стану виділяється до 8 % повітря залежно від досягнутих умов експерименту [304].

В монографії [296] розглядається концепція кавітації як основного обмеження продуктивності гідравлічних компонентів. Серед розглянутих тем – коливання тиску, кавітаційне закипання рідин через високі швидкості та їх випаровування, а також вплив кавітації на продуктивність роторних машин.

В [312] представлені різні фізичні методи (оптичні, механічні та електричні) для оцінки кількості захопленого повітря в мастило-гідравлічній системі з метою прогнозування поведінки системи гідроприводу, що містить бульбашки повітря. Вміст захопленого повітря сильно залежить від статичного тиску, оскільки повітря завжди розчинене під тиском до певного стану рівноваги.

У гідравлічних системах часто трапляється викид повітря за клапанами або дроселями у вигляді бульбашок, які можуть суттєво впливати на поведінку та продуктивність цих систем. В [307, 309] для моделювання роботи гідравлічної системи з застосуванням ГДКР типу пластини з отвором проведено експериментальне дослідження на ГДКР типу пластини з отвором для визначення швидкості дегазації розчиненого повітря в потоці через мікроотвір в умовах кавітації.

В [310, 311] розглядаються технології зниження газового фактора в гідравлічних рідинах. Показано, що присутність нерозчиненого газу негативно впливає на експлуатаційні характеристики системи, оскільки збільшує податливість гідроприводу та впливає на швидкість роботи системи керування. Зазначено, що методи зниження газового фактора включають три основні групи: скидання газу, розділення газів та дегазацію.

В [313] на випробувальному стенді досліджено характеристику швидкостей виділення та поглинання повітря зі стандартного мінерального мастила, що зазвичай використовується в гідравлічній енергетиці.

1.2.4.2. Дегазація рідини для інтенсифікації кавітаційних ефектів

Забруднення води – це всесвітня проблема, яка набуває дедалі більшої ваги та актуальності. Одним з перспективних перевірених методів очищення води є гідродинамічна кавітація. В останні роки, завдяки її успішному застосуванню для зменшення кількості фармацевтичних залишків, барвників, бактерій та вірусів, можна визнати прагнення покращити енергетичну ефективність кавітації.

При розгляді ГД кавітації та її ефективності граничні умови тиску на вході p_1 та на виході з ГДКР p_2 відіграють важливу роль. За літературними даними в процесах струменевої кавітації оптимальні для різниці тисків $\Delta p = p_1 - p_2$ оптимальними вважаються значення Δp від 5 бар до 40 бар залежно від геометрії сопла та сфери застосування [317–320].

Основним механізмом деградації органічних забруднювачів є окислення. Виникнення екстремальних термодинамічних умов у локально обмеженому об'ємі, який зазвичай називають «гарячими точками» [3, 11, 18, 59, 117], призводить до гомолітичного розщеплення води внаслідок колапсу бульбашок, що призводить до утворення різних радикалів, які, як відомо, окислюють майже всі речовини [15, 35, 121].

Автори роботи [307] окреслили два механізми, що призводять до виділення повітря: перший, коли рідина випаровується, розчинені неконденсовані гази також випаровуються і другий, коли після конденсації об'єму пари бульбашки повітря залишаються нерозчиненими в рідині, оскільки дифузійний транспорт повільніший [309, 311].

В останні роки велика кількість публікацій за результатами експериментальних досліджень ГД кавітаційної дегазації спрямована на вивчення і розуміння впливу присутності нерозчинених газів на механізми кавітації. В [124] проведено дослідження впливу розчиненого повітря на кавітацію в секції Вентурі з точним контролем вмісту розчиненого повітря. Висока концентрація розчиненого повітря збільшує кількість неконденсованих газових бульбашок, котрі залишаються після колапсу кластера, що призводить до їх посиленої осциляції. Виявилось, що

великі порожнини в основному складаються з водяної пари з обмеженим вмістом дифузного повітря. Зі зменшенням об'єму порожнини частка дифузного повітря зростає, що може послабити інтенсивність кавітації.

В роботі [321] показано, що при створенні дрібнодисперсних емульсій типу «мастило-вода» багато масел, таких як вуглеводні, натуральні олії тощо, легше диспергувати у воді у вигляді мікронних краплин, коли суміші майже повністю дегазовані. Ці спостереження ще не знайшли належного пояснення.

В [122] експериментально досліджено люмінесценцію в гідродинамічних кавітуючих потоках з підрахунком випромінюваних фотонів. Дегазовані розчини посилюють люмінесценцію, а також вихід гідроксильних радикалів. На думку авторів люмінесценція посилюється в дегазованих рідинах і сумішах з низьким тиском парів, оскільки багатоатомні молекули, такі як H_2O , N_2 , O_2 , присутні всередині бульбашок, ймовірно, гасять колапс і поглинають деяку кількість енергії.

Цикл досліджень по впливу активованих газових бульбашок на інтенсивність кавітаційних ефектів в ГДКР проведено групою німецьких науковців з Дрезденського університету [320–324], які досліджували кавітаційну деградацію органічного барвника (конго червоного) в ГДКР типу канал з вхідною і вихідною діафрагмами з урахуванням впливу на процес кавітаційних бульбашок, утворених в цьому ж реакторі. Реактор є ємністю об'ємом 0,135 л з квадратним поперечним перерізом $30 \times 30 \text{ мм}^2$ та висотою 150 мм, на вході якого як діафрагма застосовувалися сопла з діаметрами $d = 0,6 \text{ мм}$ та $d = 1,03 \text{ мм}$.

Розподіл бульбашок кавітаційного струменя в реакторі та розміри бульбашок у перерізі поруч зі струменем визначаються методом лазерного перерізу.

В проведеному циклі досліджень в кожній наступній статті, починаючи з [323] проводиться кореляцію результатів представлених в попередніх публікацій.

Дослідження пов'язує інформацію про хімічні реакції з механічними властивостями рідини [322]. Було виявлено кореляцію між співвідношенням деградації та насиченням киснем у рівноважному стані процесу. Важливим фактом

для збільшення деградації була визначена стабільність кавітації завдяки відсутності великомасштабних вихорів у початковій ділянці струменя [323].

Найкращі швидкості деградації барвника досягнуті при високій різниці тисків на вході і виході ГДКР $\Delta p = 40$ бар і оптимальному значенню протитиску на виході з ГДКР. Збільшення протитиску призводить до значного зменшення кількості бульбашок. З найвищою деградацією барвника були виявлені бульбашки розміром $d = 70\div 320$ мкм. Виявлено, що велика кількість малих бульбашок на виході з ГДКР, що виділяються, позитивно впливає на деградацію [317].

До недавнього часу вважалося, що ГД кавітація має притаманні обмеження, які перешкоджають отриманню відповідного виходу радикалів. Проведені дослідження [320–324] слід розглядати як експериментальні докази успішного утворення радикалів у гідродинамічній кавітації. В завершальній статті цього колективу авторів [324] надано висновки проведених експериментальних досліджень:

I. Існує оптимальний тиск p_2 для високої деградації органічних забруднювачів.

II. Виділення газу може посилити деградацію, якщо випущене повітря рециркулює в кавітуючий струм, оскільки воно є сильним окислювачем.

III. Виділення газу може послабити деградацію, оскільки генерація радикалів залежить від інтенсивності колапсу, яка зменшується за наявності виділення газу.

IV. При однаковому протитиску p_2 для різних розмірів сопел, досягаються однакові швидкості деградації, попри відмінності в геометрії та об'ємній витраті.

V. Емісія шуму може використовуватися як міра деградації.

Спрямовані дослідження по впливу активованих бульбашок на інтенсивність кавітаційних ефектів проведені протягом трьох років колективом науковців з різних університетів в рамках міжнародної програми ‘Bosch Research’ [126, 186, 324–328]. Метою досліджень було вивчення та розуміння механізму виділення газу у вигляді великих бульбашок в кавітуючих потоках що утворюються на виході з кавітаційного реактора за стадією колапсу утворених парогазових бульбашок. В якості ГДКР

використовувалися довгі прямокутні канали зі звуженням у формі пластини з циліндричним отвором діаметром 0,2 мм і довжиною 2 мм, після якої потік потрапляє в квадратний проточний канал розміром 1 мм × 1 мм. Дослідження проводилися при високих перепадах тиску в кавітаторі ($\Delta p = 50 \div 75$ бар) і варіації протитиску p_2 на виході з ГДКР. Як модельну рідину використовували мінеральне мастило.

В статтях [325, 326] оптичними методами аналізується виділення газових бульбашок, поява яких дуже чутлива до вхідного та вихідного тиску отвору.

Для наочності на рис. 1.15 за даними роботи п [326] представлена фотографія сукупності бульбашок, які спостерігаються потоці нижче за течією від отвору. Діаметри бульбашок коливаються в межах від приблизно 7 мкм до 0,5 мм.

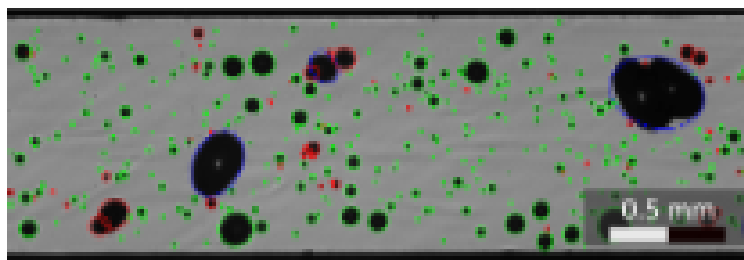


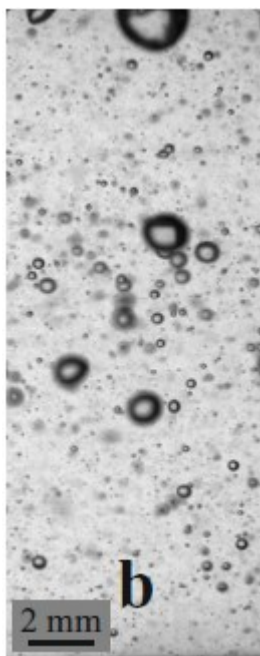
Рис. 1.15 Сукупності бульбашок, утворених в кавітаційному потоці рідини нижче від отвору (за даними [326]).

Газові бульбашки спостерігаються лише за наявності режиму кавітації. При високій різниці тисків $\Delta p = 50$ бар до 30% розчиненого повітря дегазувалося у вигляді бульбашок, причому нижче за течією від кавітаційного режиму спостерігається понад 23 % початково розчиненого повітря у вигляді бульбашок. Автори пояснюють це тим, що значна кількість вивільненого повітря знову реабсорбується в рідину за течією.

В [19, 327] визначалася швидкість дегазації розчиненого повітря в потоці через мікроотвір в умовах кавітації з урахуванням утворення пари, що, на думку авторів, відіграє ключову роль у механізмі дегазації. Зазначено, що дифузійний масоперенос розчиненого повітря в утворені парові порожнини є домінуючим механізмом спостережуваних явищ виділення повітря. В роботі [186] проведено

теоретичний аналіз результатів проведених комплексних досліджень, опублікованих в роботах [126, 186, 324–328]. Запропоновано підхід, який поєднує спрощену рівноважну модель фазового переходу рідина-пара з нерівноважною дифузійною моделлю, що описує процес виділення газу. Отримані розподіли гідродинамічних параметрів та частки газової фази показують суттєвий вплив розчиненого газу на еволюцію кавітаційних структур, що якісно узгоджується з експериментальними спостереженнями.

Автори роботи [126] визначили мету проведеного ними дослідження, як знаходження кореляції між основними ГД характеристиками потоку та фракціями вільного газу в бульбашках, що утворюються за отвором діафрагми або в горловині сопла Вентурі. В даному експерименті в якості ГДКР застосовано циліндричний канал діаметром 30 мм і довжиною 30 см, на початку якого розміщено пластинку з отвором з діаметром 3 мм. В експерименті незалежно регулювалися рівні тиску p_1 перед отвором та p_2 після отвору, які могли змінюватися в межах від 0 до 10 бар. Фракції повітряних бульбашок визначаються за допомогою тіньової візуалізації.



Показано, що підвищена активність кавітації призводить до швидкого збільшення кількості та розміру бульбашок газу в режимі замикання. При перепаді тиску $\Delta p = 5$ бар і протитиску на виході ГДКР $p_2 = 0,7$ бар в каналі на відстані 30 см від отвору реєструвалися бульбашки з розмірами в інтервалі від 0,02 до 4,23 мм.

Репрезентативні тіньові зображення для вхідного тиску $p_1 = 5,8$ бар та вихідного тиску $p_2 = 0,7$ бар, одержані в цьому дослідженні, показані на рис. 1.16.

Рис.1.16. Репрезентативні тіньові зображення потоку рідини на відстані 30 мм після отвору з тиском на вході $= 5,8$ бар і протитиском $p_2 = 0,7$ бар (за даними [126]).

Розмір бульбашок повітря збільшується зі зростанням інтенсивності кавітації. Завдяки силам плавучості більші бульбашки швидше піднімаються до верху труби. Тому середній розмір і кількість бульбашок у зафіксованому об'ємі має тенденцію до зменшення нижче за течією від зони кавітації, в той час як великі об'єми повітря накопичуються у верхньої стінки, як показано на рис. 1.16. Розподіл бульбашок за розміром газу, що генерується, мабуть, залежить від інтенсивності кавітації, що призводить до злиття бульбашок вниз за течією через більш високої кількості утворених бульбашок.

При постійному тиску на вході p_1 зі зменшенням протитиску p_2 і, отже, збільшенням інтенсивності кавітації збільшується частота появи бульбашок з радіусами $R > 0,8$ мм. Спостерігається загальна тенденція переходу від меншого розміру бульбашок до більшого зі збільшенням інтенсивності кавітації.

1.2.4.3. Видалення небажаного газу

Видалення небажаного розчиненого газу з рідини є важливою операцією у багатьох процесах. В роботі [329] досліджується придатність УЗ свистка (струменевого типу) для дегазації рідин. Перевага свистка в тому, що він є проточним пристроєм і не вимагає зовнішнього джерела живлення. За допомогою цього пристрою проведено дегазацію вуглекислого газу у воді за умов протитиску $p_2 = 2,5$ бар. Виміряна дегазація становила $(30 \pm 4)\%$ при об'ємній витраті 110 л/хв.

В [125] досліджувалась кавітація у водних розчинах вуглекислого газу. Оцінювалася швидкість ерозії та записувалися спектри кавітаційного шуму. Показано, що у пересиченому розчині інтенсивність кавітації близька до нульової. По мірі дегазації інтенсивність кавітації зростає, до рівня активності в дистильованій воді. В роботі [303] проаналізовано ефективність гідродинамічної кавітації як привабливого альтернативного методу термічного випаровування. Зазначено, що видалення летких сполук ефективне за умови, що діаметр леткої бульбашки становить приблизно 10% діаметра труби кавітаційного реактора.

В статті Знака З. О. та ін. [110] запропоновано концепцію кавітаційно-флотаційної технології очищення стічних вод, що передбачає генерування кавітаційних бульбашок з їх подальшим використанням на стадії флотації. Наведено результати досліджень залежності ефективності роботи гідродинамічного струменевого кавітатора з соплом від конструктивних параметрів сопел при тиску на вході в кавітатор 0,2–0,6 МПа і на виході 0,1 МПа. Встановлено оптимальний режим кавітаційного оброблення води та генерування кавітаційних парогазових бульбашок.

Аналогічна кавітаційна технологія застосована в роботі [330] для флотації ультрадрібних частинок. Досліджено вплив нано- та мікробульбашок на флотацію дрібних (38 мкм) частинок халькопіриту. Наномікробульбашки створювалися за допомогою спеціально розробленого генератора, заснованого на явищі кавітації в трубках Вентурі. Результати випробувань показали, що вилучення ультрадрібних частинок халькопіриту шляхом флотації збільшилося приблизно на 16–21%.

В цих гібридних технологіях одночасно підвищувалась ефективність флотації і проводилися дегазація води.

Група японських дослідників з Нагайського політехнічного університету провела цикл систематичних досліджень по дегазації рідин із застосуванням методів ГД кавітації [197, 223, 331–333]. Вилучення з рідини неконденсованих газів досягалось шляхом відкачування вакуумним насосом повітря зі стабільної кавітаційної вакуумної порожнини, утвореної на стінці каналу зі звуженням в зоні нижче за течією від виходу з ділянки звуження – в найбільш розвиненій області кавітації. Як канал зі звуженням використовувалося сопло Вентурі або діафрагма. В якості модельної рідини застосовувалося гідравлічне мастило, яке містить розчинене повітря. Було досліджено два визначальних фактори з точки зору їх впливу на продуктивність, а саме швидкість потоку через звуження та тиск на виході із сопла. Збільшення швидкості потоку призводить до кращої деаерації, а зниження тиску на виході з сопла на 60% збільшує продуктивність деаерації на 33%. Мутне на початку деаерації мастило в міру перебігу деаерації ставало прозорішим.

При апробації методу на установці з 25 л мастила в ємності вміст газу в ній за 30 хвилин обробки знизився на 40% [331].

Подальші дослідження в цьому напрямі, проведені цією ж групою дослідників, підтвердили, що явище створення стабільного парового шару на стінці каналу на виході з горловини присутнє і в потоці води [197]. Однак, процес розвитку вакуумної порожнини в потоках води відрізняється від такого в потоках гідравлічного мастила, що, на думку авторів, пояснюється великою різницею чисел Рейнольдса між обома потоками. При збільшенні швидкості потоку об'єм каверни зростає, причому тиск всередині каверни в режимі без відкачування газу точно дорівнює тиску насиченої пари води.

1.2.4.4. Огляд патентів по кавітаційній дегазації

В патенті [296] описується спосіб дегазації води, в якій початкова концентрація розчиненого повітря відповідає концентрації насичення при атмосферному тиску. Запропонований пристрій дозволяє швидко скинути концентрацію повітря на 80% у вакуумній сепараційній камері за рахунок попереднього введення мікробульбашок повітря у воду і проведення кавітаційної дегазації з застосуванням п'яти інжекторів складної конструкції, кожен з яких містить до 40 інжекційних отворів.

Рідина за допомогою потужного насоса рециркулює з витратою 1800 м³/год з сепараційної камери через інжекційну камеру, і знову разом з утвореними газовими бульбашками розміром 50–100 мкм входить в сепараційну камеру. Сепараційна камера містить воду об'ємом 270 м³ і площею вільної поверхні в декілька м². Газове середовище над цією поверхнею є сумішшю повітря і водяної пари, що відкачується вакуумним насосом для підтримки постійного тиску при дегазації порядку 0,1 атм.

Контрольована частина рідини відбирається з рециркуляційного контуру і за допомогою насоса високого тиску проходить через камеру насичення, яка містить повітря під тиском до 10 атм, і далі перенасичена повітрям повертається в рециркуляційну лінію і подається на вхід кавітаційних інжекторів. За рахунок цієї

частини перенасиченої газом рідини при подальшому скиданні тиску в сепараторі утворюються газові бульбашки великого розміру, які містять 80% початково присутнього у воді розчиненого газу і виносять його в атмосферу.

Автори патенту зазначають, що з використанням традиційних технологій дегазація такого ж об'єму води потребує більше 50 годин.

В даному патенті для ефективної деаерації води також необхідно попередньо провести її аерацію до суттєвого перенасичення повітрям.

В патенті [297] описано систему для швидкого видалення з рідини розчинених газів, в якій рідина подається під тиском в кавітаційне сопло Вентурі. У звужуючій секції сопла (конфузорі) утворюються парогазові мікробульбашки, а в наступній прямій вузькій секції (горловині) відбувається зростання і часткова коалесценція цих бульбашок. У вихідній секції – дифузорі, відбувається подальше злиття бульбашок, причому присутня в бульбашках водяна пара, що конденсується в рідині на виході з сопла містить газові бульбашки великого розміру. Далі потік рідини разом з бульбашками, що злилися, відокремлюється від решти потоку і присутніх в ньому мікробульбашок. Відокремлений потік рідини з великими повітряними бульбашками розпилюється у вакуумній камері після чого вміст бульбашок – суміш повітря і пари за допомогою вакуумного насоса відкачується в атмосферу. Рідина з вакуумної камери за допомогою насоса подається на наступну стадію рециркуляції. Для досягнення бажаного рівня дегазації рідини можна використовувати будь-яку кількість стадій рециркуляції.

Автор патенту акцентує увагу на тому, що горловина сопла може бути відрегульована для досягнення в ній майже абсолютного нульового тиску, а потім збільшена до рівня трохи нижче тиску насичення, щоб досягти максимального злиття мікробульбашок газу. У дифузорі пара усередині бульбашок швидко конденсується, як тільки тиск підніметься вище тиску насиченої пари. Таке пояснення з боку автора свідчить про нерозуміння фізичних механізмів кавітаційних процесів, які перебігають в запропонованому пристрої.

Даний винахід відноситься, зокрема, до систем дегазації води для живлення котлів або видалення небажаних агресивних газів, таких як кисень, діоксид вуглецю, сірководень тощо. Він може також застосовуватися при видаленні розчинених вуглеводневих газів з сирової нафти, а також для миттєвого випаровування з нафти розчинених летких речовин.

В патенті [298] розглянуто спосіб деаерації рідини, особливо води, яка містить повітря, кисень, азот або інший розчинений в ній газ, за допомогою створення потоку рідини, що тече з постійною швидкістю під заданим тиском у трубі з заданим перетином лінії рециркуляції.

На рис. 1.17 зображено пристрій для здійснення даного винаходу.

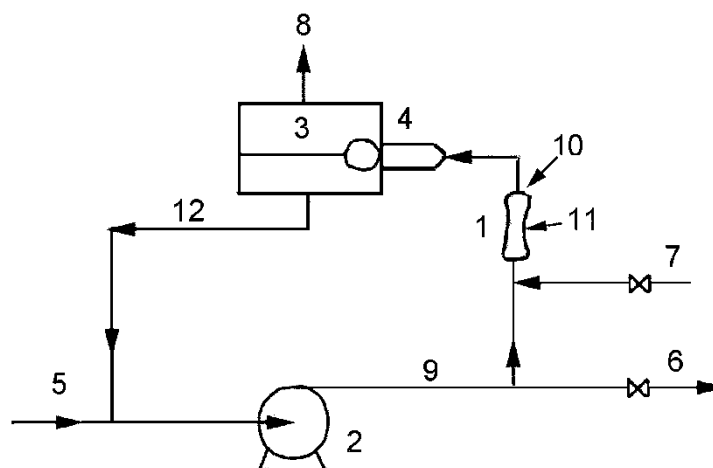


Рис. 1.17. Схема кавітаційного пристрою дегазації води з патенту [298] (Бразилія).

Насичений повітрям потік води 5 подається до насоса 2 і після виходу з нього через ділянку лінії 9 рециркуляції подається під тиском на вхід кавітаційного пристрою 1 типу сопла Вентурі. Всередині пристрою 1 в області звуження 11 потік прискорюється, а тиск знижується до значення дещо нижчого від точки кипіння, внаслідок чого розчинений газ в складі парових бульбашок вилучається з рідини.

На виході 10 з кавітаційного пристрою 1 тиск рідини вищий від тиску у звуженій ділянці 11 і газ прагне повторно розчинитися в рідині. Ємність 3 спроектована таким чином, щоб газ і деаерована рідина, швидко розділялися. Потік

рідини 12 з ємності 3 за допомогою насоса 2 надходить у лінію рециркуляції, а великі газові бульбашки швидко спливають і виходять з ємності 3 через вентиляційний отвір 8 до того, як повторно почне розчинятися в рідині. Деаерована рідина виходить з лінії рециркуляції через трубопровід 6.

Перед входом рідини в кавітаційний пристрій 1 в неї для поліпшення деаерації через газовий інжектор 7 вводиться додатковий потік повітря або іншого газу, який допомагає видалити цільовий розчинений газ з води в області 11 та в ємності 3. Газовий інжектор 7 створює дрібнодисперсні бульбашки, які через надзвичайно розвинену поверхню контакту фаз забезпечують інтенсивний масоперенос на межі розділу фаз і при цьому швидко розчиняються у воді.

В цьому патенті, як і в інших, розглянутих вище, висока ефективність дегазації рідини досягається за рахунок її попереднього перенасичення шляхом ежекції додаткової кількості повітря.

На думку авторів, запропонований ними метод кавітаційної дегазації є привабливою альтернативою заміни традиційних термічних і вакуумних деаераторів з точки зору суттєвого зниження енергетичних та капітальних витрат.

В патенті [299] описано метод швидкої деаерації рідин з застосуванням як деаераційного пристрою проточного каналу, який складається з еластичної трубки, котра деформується, і до якої прикріплено механізм зміни площі перерізу трубки. При стисканні трубки під дією цього механізму площа перерізу трубки зменшується і утворюється дросельна ділянка. Зміна площі перерізу трубки дозволяє контролювати кількість утворених бульбашок доводячи їх до цільового значення. Отже, деаераційний пристрій є по суті трубкою Вентурі змінної геометрії.

Запропонований пристрій призначений для попереднього видалення розчиненого повітря з рідини, яка використовується в УЗ пристроях для очищення металевих поверхонь. При цьому дегазація очищувальних рідин вкрай важлива для досягнення задовільних результатів УЗ очищення, оскільки висока концентрація розчиненого в рідині повітря запобігає поширенню УЗ хвиль, а це призводить до дисипації енергії, зниження звукового тиску та ефективності акустичного очищення

поверхонь. В даному винаході система УЗ очищення оснащена деаераційним пристроєм для зниження концентрації розчиненого повітря.

Процес деаерації включає проходження рідини через сопло Вентурі з достатньою швидкістю, щоб розрідження за дросельною ділянкою створювало негативний тиск для витягування з рідини розчиненого в ній газу. Вилучений таким чином газ утворює бульбашки достатньо великого розміру, щоб вони після виходу з деаераційного пристрою і входження разом з потоком в бак з очищувальною рідиною спливали на поверхню не розчиняючись повторно в рідині. Принципова схема установки деаерації показана на рис. 1.18.

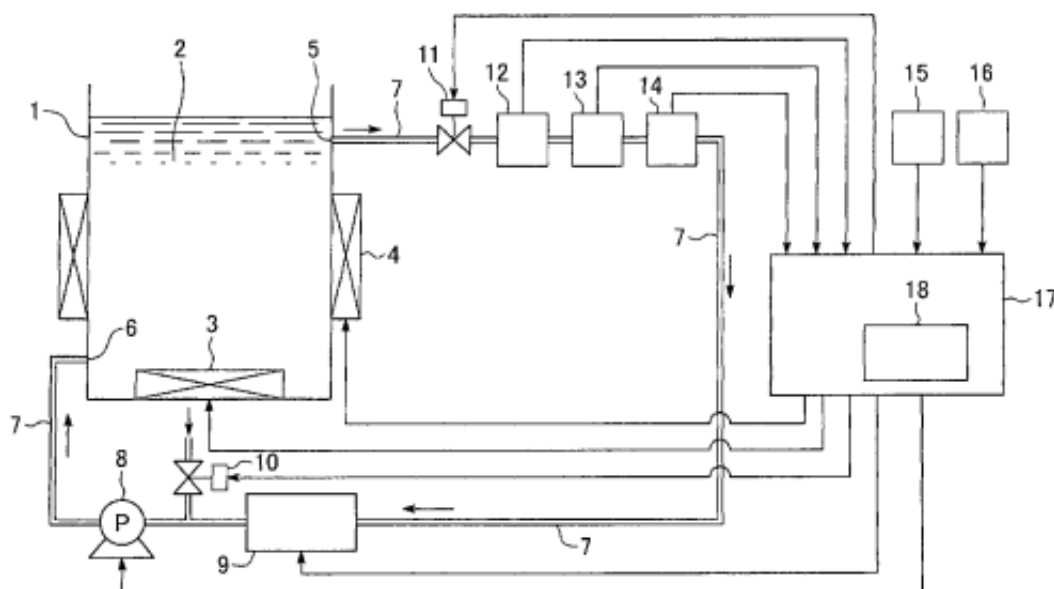


Рис. 1.18. Схема експериментального стенда з дегазації [299]:

1 – бак; 2 – рідина для УЗ очищення; 3 – генератор УЗ хвиль; 4 – нагрівач; 5 – впускний отвір; 6 – випускний отвір; 7 – канал циркуляції рідини; 8 – пропелерний насос; 9 – кавітаційний деаераційний пристрій; 10 – клапан подачі повітря з регульованим ступенем відкриття; 11 – клапан регулювання витрати; 12 – датчик вимірювання витрати; 13 – датчик температури рідини; 14 – датчик концентрації оточуючого повітря; 15 – датчик температури оточуючого повітря; 16 – датчик вологості оточуючого повітря; 17 – керуючий пристрій; 18 – комп’ютер для аналізу даних.

На думку авторів зростання бульбашок відбувається внаслідок переходу розчиненого повітря в кавітаційні бульбашки на стадії їх колапсу, але в тексті патенту немає пояснення такого механізму.

Детальний аналіз патенту дозволяє зробити висновок, що у всіх наведених в патенті прикладах утворення великих бульбашок пов'язане з тим, що в рідину безпосередньо перед її входом в деаераційний пристрій через клапан подачі повітря (позиція 10 на рис. 1.18) вводиться додаткова кількість повітря.

Отже, для ефективної деаерації рідини треба попередньо провести її аерацію.

В патенті [300] запропоновано спосіб дегазації рідини і пристрій для його здійснення, котрі включають чотири фізичні процеси: попередню аерацію рідини, наступну гідродинамічну кавітацію, механічне розпилення рідини в результаті удару струменя об стінку та винесення вилучених з води газів потоком повітря.

Схема пристрою для дегазації рідини показана на рис 1.19.

Пристрій складається з дегазаційної камери 4 з аератором 1 у вигляді компресора або ежектора, що нагнітає повітря в потік рідини, нагнітальних патрубків 2, струменевих отворів 3 для ініціювання явищ гідродинамічної кавітації та утворення потужних струменів, вентилятора 5 для подачі потоку повітря в дегазаційну камеру, повітряних патрубків 6 і 7, відповідно для підведення в камеру повітря та відведення з неї виділених газів, а також гідрозатвора 8 для запобігання надходженню видалених газів у потік очищеної рідини.

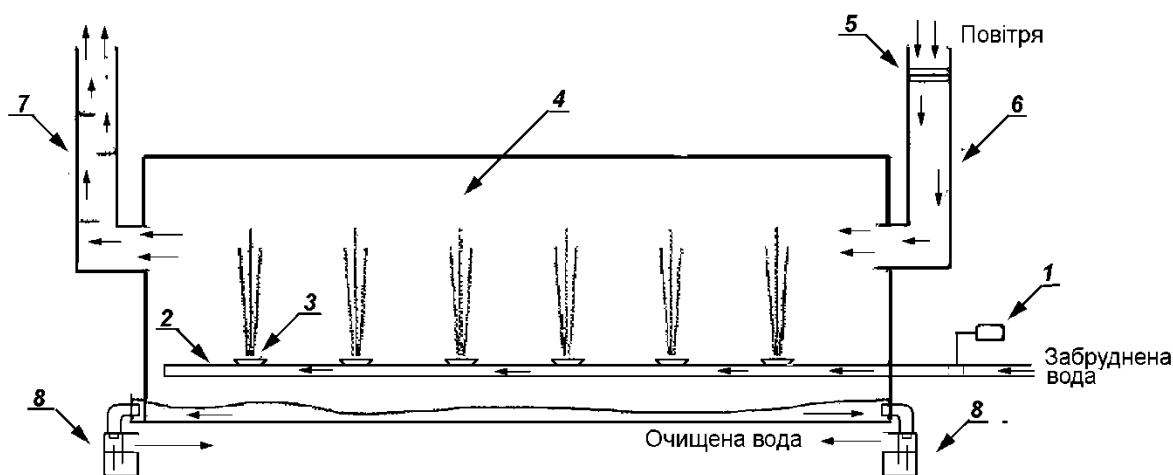


Рис. 1.19. Схема пристрою для дегазації води з патенту [300].

Нагнітальні патрубки 2 зі струменевими отворами 3 фактично виконують роль ГДКР типу пластинки з отворами з одночасним механічним розпорошенням рідини в результаті удару струменя об стінку, що забезпечує відділення і видалення розчинених газів.

За думкою авторів, запропонований в патенті спосіб дегазації відрізняється тим, що в камері проводять попередню аерацію рідини в потоці (ежектор 1), в процесі якої оброблювана рідина насичується повітрям і створюються кавітаційні зародкові ядра, котрі потім ініціюють ГД кавітацію.

Отже, і в даному патенті для ефективної деаерації рідини потрібно попередньо провести її аерацію.

В патенті [301] описані пристрої для видалення газів та/або летких домішок з рідин. Рідина за допомогою насоса під високим тиском подається на вхід кавітаційного пристрою, в якому проходить як мінімум через одне локальне звуження в проточній камері для створення в потоці кавітаційних мікробульбашок за умови, що тиск в зоні звуження спадає нижче тиску насиченої пари. Розчинені гази мігрують в утворені бульбашки збільшуючи їх розмір та кількість газу всередині кожної з них. Видалення з рідини розчинених газів досягається шляхом подальшого об'єднання дрібних мікробульбашок у більш крупні бульбашки. Дрібні бульбашки важко вивести з рідини через надмірно тривалий час їх спливання. Розчинені гази мігрують у кавітаційні бульбашки.

Важливим аспектом винаходу є наступна коагуляція і укрупнення утворених мікробульбашок в основному потоці шляхом пропускання рідини з постійно спадаючою швидкістю і, відповідно, зростаючим тиском через одну або декілька ділянок зміни напрямку та різких поворотів кільцевого каналу після початкової обробки рідини в ковергентно-дивергентному кавітаційному пристрої.

На виході з пристрою в резервуарі під атмосферним тиском крупні бульбашки з газом відокремлюються від рідини за рахунок їх спливання. Рідина у процесі рециркуляції багаторазово протікає через кавітаційний пристрій в результаті чого концентрація розчинених газів стає нижчою, ніж у вихідному потоці рідини.

В авторському свідоцтві на винахід [302] запропоновано пристрій для дегазації рідини призначений для застосування в хімічній, нафтовій та харчовій промисловості, в енергетиці, опріснювальних установках та інших виробництвах.

Пристрій, схема якого показана на рис. 1.20, містить циліндричну камеру 1, виконану у вигляді трубопроводу, з патрубками входу 2 і виходу 3 рідини. Всередині камери 1, перпендикулярно до її осі, розташований кавітаційний елемент у формі диска 4. По осі кавітаційного елемента є наскрізний отвір 5, в якому встановлений патрубок 6 відведення газу.

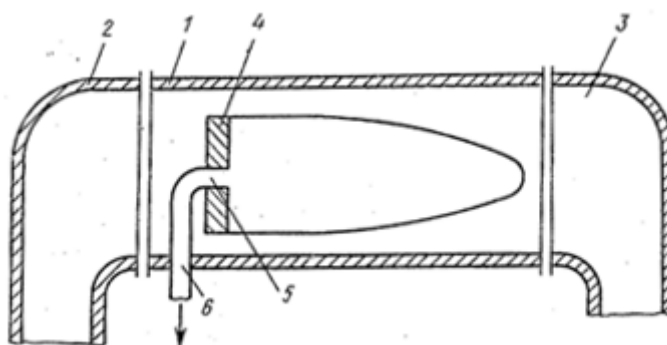


Рис. 1.20. Схема пристрою для дегазації рідини [302].

Рідина під тиском надходить по патрубку 2 в камеру 1. При обтіканні кавітаційного елемента, відбувається механічний розрив рідини за диском 4 з утворенням розвиненої кавітаційної порожнини – суперкаверни, розміри якої залежать від гідродинамічних умов в потоці. У каверну з рідини інтенсивно виділяється вільний та розчинений газ, який відсмоктується через патрубок 6.

Для зменшення концентрації розчиненого газу в рідині до заданої величини потік рідини має пройти декілька циклів рециркуляції через кавітаційний елемент. Раціональні режим роботи пристрою в залежності від витрати та тиску на вході вибираються шляхом підбору оптимального розміру диска та довжини камери за диском.

1.3. Аналіз сучасного стану проблеми нейтралізації кислого конденсату продуктів згоряння природного газу

Однією з основних нагальних задач промислово розвинених країн світу є питання енергозбереження. В умовах постійного зростання ціни на природний газ скорочення обсягів його споживання є дуже актуальною проблемою.

Зокрема, в промисловості і комунальному господарстві України станом на початок 2022 року експлуатували понад 100 тис. котлів, які працюють на природному газі. З них понад 30 тис. котлів доцільно експлуатувати в режимі глибокої утилізації теплоти димових газів. Особливістю цього режиму є те, що димові гази охолоджуються до температури нижче точки роси, що супроводжується частковою конденсацією водяної пари [334]. Кислий конденсат, який утворюється при спалюванні природного газу, на сьогоднішній день не знаходить застосування у промисловості і надходить у стічні води підприємства. Через те, що водневий показник утвореного конденсату знаходиться приблизно в діапазоні $\text{pH} = 3\div 4$ його не можна скидати як стічну воду без попередньої нейтралізації так як pH для стічної води, згідно чинних норм в Україні, повинен знаходитись в межах $6,5\div 8,5$ [335]. У країнах Євросоюзу більш суворо регламентується скидання кислого конденсату в каналізаційну мережу, наприклад в Німеччині існують приписи [336] щодо відведення в міську каналізацію конденсату від конденсаційних котлів залежно від їхньої потужності.

Найчастіше для нейтралізації кислого конденсату використовують доломіт, який є відносно доступним і дешевим матеріалом. Нейтралізований таким способом конденсат надходить в стічні води підприємства. Проте, за своїм складом кислий конденсат, в основному, є водним розчином діоксиду вуглецю з незначною кількістю домішок оксидів азоту і не містить солей жорсткості тому доцільно розглянути альтернативні способи його нейтралізації з метою використання для технологічних потреб підприємств, а також як води для живлення водогрійних котлів промислових і комунальних котельних. Попередні розрахунки показали, що утвореної кількості кислого конденсату повинно повністю вистачити на

задоволення потреб котельних у воді для живлення котлів тому пристрої для нейтралізації кислого конденсату стають актуальними.

Існують два способи нейтралізації кислого конденсату: нейтралізація хімічними реагентами і нейтралізація з використанням масообмінних процесів.

Нейтралізацію кислого конденсату хімічними реагентами можна здійснювати на пристроях з використанням твердого реагенту, автоматизованих пристроях для рідинної нейтралізації, а також використовуючи спеціальні хімічні реагенти на основі нейтралізуючих амінів [337–339].

Принцип дії пристроїв для нейтралізації кислого конденсату з використанням твердого реагенту ґрунтується на пропусканні кислого конденсату через шар нейтралізуючого реагенту [232, 340]. Використання пристроїв даного типу не передбачає можливості ні регулювати, ні підтримувати на постійному рівні кінцеве значення водневого показника. Економічно доцільно використовувати цей спосіб для котлів потужністю до 1000 кВт. Як наочний приклад на рис. 1.21 зображений пристрій для нейтралізації кислого конденсату з використанням твердого реагенту фірми VISSMANN [341].

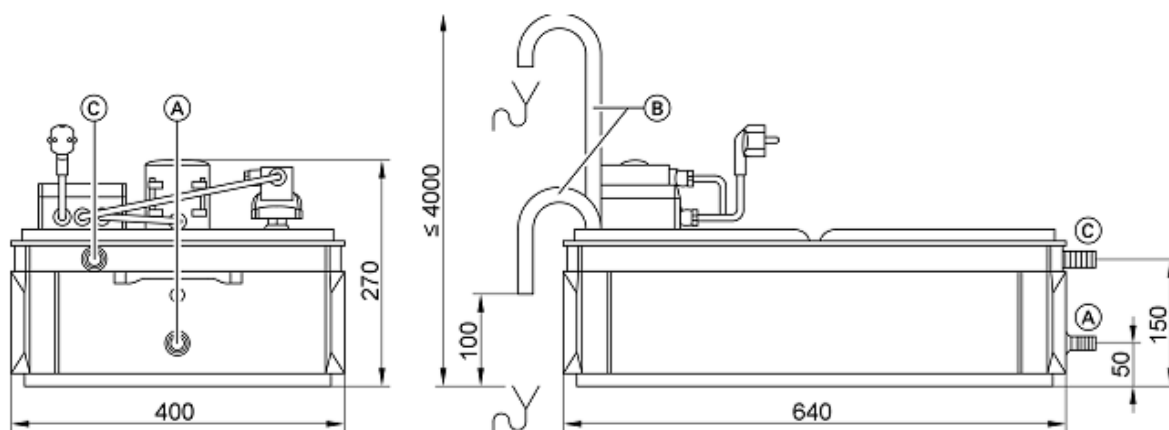


Рис. 1.21. Пристрій для нейтралізації кислого конденсату з використанням твердого реагенту фірми VISSMANN: А – патрубок введення кислого конденсату; В – патрубок виведення нейтралізованого конденсату; С – аварійний злив.

Незважаючи на характерні недоліки пристрої цього типу, внаслідок їх простоти і відносної дешевизни, використовуються на невеликих котельних. Також

такий спосіб нейтралізації конденсату використовується у розвинених країнах світу в котельних окремих будинків, квартир і споруд зі встановленими котлами конденсаційного типу для запобігання пошкодження сантехнічних систем, забруднення ґрунтів і ґрунтових вод, погіршення місцевої інфраструктури водопостачання і водоочисних споруд. Існуючі нейтралізатори конденсату з твердим реагентом працюють за єдиним принципом – пропусканням кислого конденсату через спеціальні фільтри з наповнювачем, який періодично змінюється. Критерієм для оцінки ефективності наповнювача з метою його вчасної заміни є контроль користувачем обладнання відхилення значення рН нейтралізованого конденсату від нормативного. В Україні внаслідок модернізації і заміни застарілого обладнання поступово зростає частка котлів конденсаційного типу як в промисловому так і в житловому секторах тому пристрої для нейтралізації кислого конденсату також стають актуальними.

Підвищення ефективності пристроїв для нейтралізації кислого конденсату з використанням твердого реагенту здійснюють шляхом їх модернізації. В роботі [232] досліджено процес нейтралізації конденсату з використанням доломіту і модифіковано камеру нейтралізації пристрою таким чином, щоб подовжити час утримування конденсату в пристрої шляхом додавання перегородок у камеру нейтралізації разом з застосуванням більш дрібної фракції доломіту (1,8–3,15 мм). Автори стверджують, що час утримування кислого конденсату в камері нейтралізації пристрою є важливим параметром для забезпечення його ефективної нейтралізації.

В роботі [342] авторами проаналізовано можливості корисного використання або нейтралізації конденсату, утвореного в системах утилізації теплоти газових котлів при глибокому охолодженні димових газів. і запропоновано технічне рішення нейтралізатора конденсату з використанням методу його фільтрації в шарі мармурової крихти з наведенням прикладу його застосування.

Принцип дії пристроїв для рідинної нейтралізації ґрунтується на додаванні до кислого конденсату рідкого реагенту та здійснюється за допомогою системи

керування і дозуючого насоса. Використання автоматизованих пристроїв даного типу дає можливість отримувати стабільне кінцеве значення водневого показника, а також регулювати його в досить широких межах. Економічно доцільно використовувати такі пристрої для котлів потужністю понад 1000 кВт.

Як приклад, на рис. 1.22 зображений автоматизований пристрій для рідинної нейтралізації кислого конденсату фірми VISSSMANN.

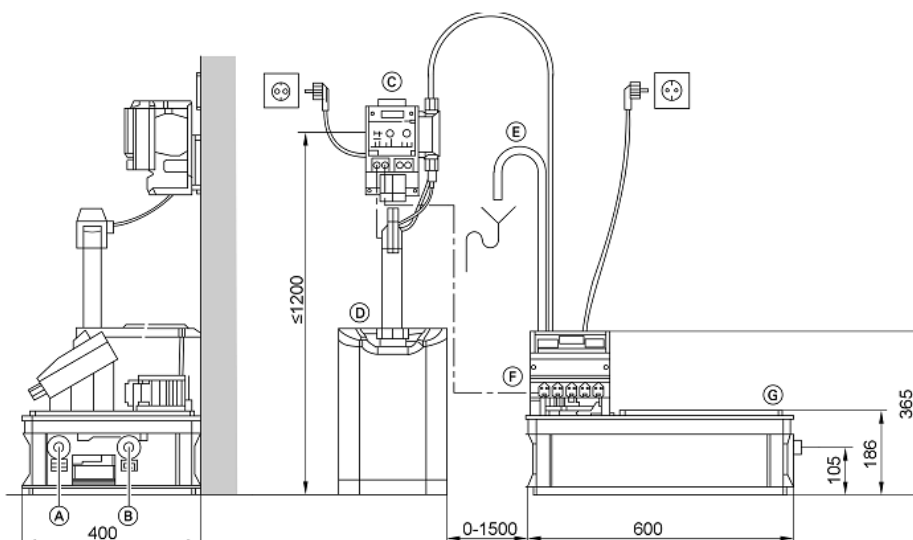


Рис. 1.22. Автоматизований пристрій для рідинної нейтралізації кислого конденсату фірми VISSSMANN: А – аварійний злив; В – патрубок введення кислого конденсату; С – насос для дозованої подачі нейтралізуючого реагенту; D – ємність з нейтралізуючим реагентом; Е – патрубок виведення нейтралізованого конденсату; F – система керування; G – ємність для нейтралізації кислого конденсату.

Найбільшого поширення вищезгадані способи отримали в країнах Євросоюзу. Системи для нейтралізації кислого конденсату в галузі комунальної енергетики України на даний час лише починають розглядатись для застосування, що вказує на все ще поширену експлуатацію газових котлів без використання режиму глибокої утилізації теплоти димових газів. При такій експлуатації котлів кислий конденсат не утворюється, так як водяна пара разом з димовими газами потрапляє в атмосферу. Істотним недоліком такої експлуатації є низька ефективність роботи котлів і високе споживання палива, тому актуальною є потреба їх модернізації.

Недоліком вищезгаданих способів є забрудненість нейтралізованого конденсату продуктами реакції нейтралізації і, внаслідок цього, неможливість його повторного використання. Використання автоматизованих систем нейтралізації шляхом дозування рідкого реагенту також пов'язане зі значними грошовими витратами.

Так як утворений кислий конденсат не містить солей жорсткості його доцільно після нейтралізації (не забруднюючи при цьому сторонніми реагентами) направляти в систему підготовки води для живлення котлів, оскільки відпадає потреба використання стадії пом'якшення води, яка є найбільш затратною. Використовуючи існуючі розробки, конденсат можна нейтралізувати додаванням спеціальних хімічних реагентів або декарбонізацією.

До спеціальних хімічних реагентів відносять речовини на основі нейтралізуючих амінів призначених для корекції водневого показника води для живлення котлів, які виготовляються такими фірмами як AGBOR ENGINEERING, ASHLAND HERCULES WATER TECHNOLOGIES, GE BETZ INC, ТЕХНОХИМПРЕАГЕНТ та ін. Висока вартість цих реагентів робить економічно недоцільним їх використання для нейтралізації кислого конденсату.

Хімічні методи захисту енергетичного обладнання від корозії і утворення накипу забезпечують, з одного боку, видалення з води агресивних домішок, таких як кисень (до 0,015 мг/кг) і вільна вуглекислота (до 3-7 мг/л), а з іншого – застосовують додавання реагентів як інгібіторів корозії. Як інгібіторикорозії використовуються, зокрема, плівкоутворюючі аміни і суміш амінів жирних кислот (C17-C21). Вони захищають від кисневої і вуглекислотної корозії як обладнання, так і трубопроводи, що використовуються для перекачування промислового конденсату [343, 344]. Основною причиною обмежень використання хімічних реагентів є значне забруднення конденсату залишковими побічними продуктами реакції і, відповідно, його непридатність для повторного використання.

Нейтралізацію кислого конденсату з використанням масообмінних процесів можна проводити на апаратах абсорбційного типу (декарбонізаторах).

Процес декарбонізації води ґрунтується на вилученні з неї розчиненого вуглекислого газу в результаті контакту з повітрям і є одним з найскладніших масообмінних процесів у підготовці води в теплоенергетиці. Його перебіг зумовлений значною кількістю взаємозалежних факторів, здатних змінюватись в широкому діапазоні (наприклад, розчинність вуглекислого газу у воді залежить від її температури, яка в процесі декарбонізації змінюється) [345].

Існує два типи декарбонізаторів: протитечійні і прямоточні.

Як протитечійний декарбонізатор можна використовувати будь-який з відомих протичечійних контактних пристроїв. В теплоенергетиці використовують насадкові (насіпні) апарати (рис. 1.23) [346].

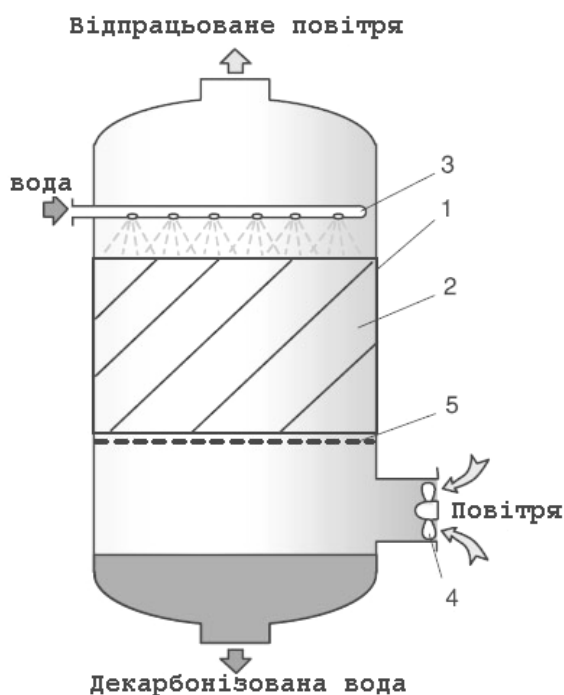


Рис. 1.23. Схема протитечійного декарбонізатора з насадкою:

1 – корпус; 2 – насадка (кільця Рашига); 3 – система рівномірного розподілу води; 4 – вентилятор; 5 – решітка для рівномірного розподілу повітря.

Як насадку в них використовують керамічні кільця Рашига трьох типорозмірів. Ці кільця в нижніх 8–12 шарах викладають регулярно, а на всю іншу висоту засипаються «в навал». Знизу вентилятором подають повітря. Декарбонізатори такої конструкції використовуються понад 60 років і є морально

застарілими. Недоліком апаратів даного типу є їхні значні габарити, висока вартість, складність в обслуговуванні і ремонті, а також необхідність індивідуального проектування для конкретних умов.

На сьогоднішній час як прямоточні декарбонізатори використовують ежекційні апарати – водоструминні ежектори і прямоточні розпилювальні тепломасообмінні апарати.

Використання водоструминних ежекторів як декарбонізаторів обмежене початковою концентрацією вуглекислого газу, яка не повинна перевищувати 20 мг/кг так як коефіцієнт ежекції традиційних пристроїв не перевищує 4.

Розроблені також багатоступеневі ежектори з коефіцієнтом ежекції від 20 до 30 принцип дії яких ґрунтується на ежекції струминою води по мірі її руху від однієї ступені до іншої нових порцій повітря. З точки зору техніко-економічних показників даного типу ежектори важко визнати вдалим для нейтралізації конденсату.

Однією з останніх розробок на базі водоструминних ежекторів є вакуумно-атмосферний деаератор «АВАКС». Згідно тверджень розробника в конструкції установки закладені абсолютно нові технічні рішення, використовуються процеси кавітації, дроселювання, турбулентної дифузії, відцентрової сепарації тощо. Принципову схему вакуумно-атмосферного деаератора «АВАКС» наведено на рис. 1.24.

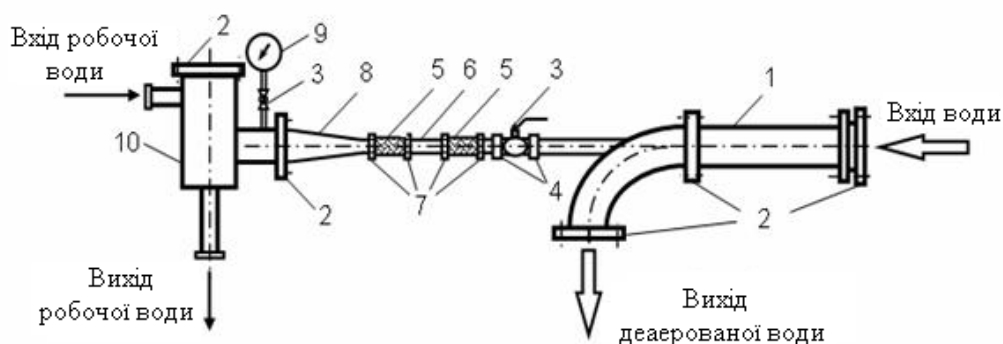


Рис. 1.24. Принципова схема вакуумно-атмосферного деаератора «АВАКС»: 1 – деаератор; 2 – фланці; 3 – кран; 4 – різьбові з'єднання; 5 – гумовий шланг; 6 – скляна трубка; 7 – хомути; 8 – дифузор; 9 – вакуумметр; 10 – водоструминний ежектор.

Застосування деаератора даного типу дає можливість значно прискорити швидкість деаерації і отримувати воду з практично відсутнім вмістом розчиненого вуглекислого газу. Пристрій характеризується невисокими габаритами і масою.

Недоліком установок даного типу є недостатньо стійка робота при нестабільній подачі рідини, максимальна продуктивність не перевищує 200 т/год., температура води на вході в деаератор повинна бути не нижче 60 °С. Також слід зазначити, що відсутні дані щодо кінцевого вмісту вільної вуглекислоти після обробки кислого конденсату, оскільки її початковий вміст досить високий.

Прямоточні розпилювальні тепломасообмінні апарати можуть мати різноманітне конструктивне оформлення. Коефіцієнт ежекції при їхньому використанні може досягати і навіть перевищувати 1000, а продуктивність знаходиться в діапазоні від одиниць до сотень м³/год без жорсткості режимних параметрів. На рис. 1.25 наведено схему двостороннього двосекційного декарбонізатора [346].

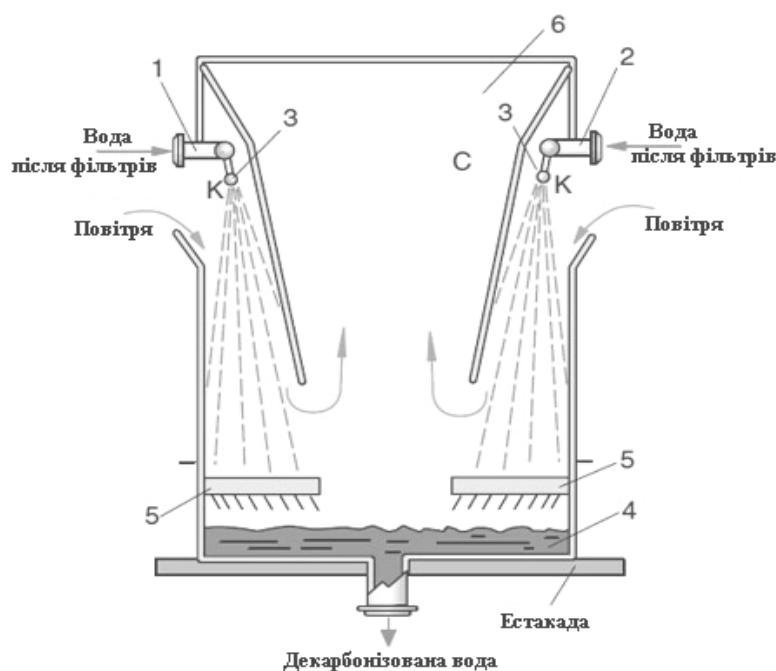


Рис. 1.25. Схема прямооточного розпилювального двосекційного декарбонізатора: 1, 2 – водорозподільні колектори; 3 – форсунки; 4 – піддон; 5 – система піногасіння; 6 – корпус; К – зони контакту (краплин води і повітря); С – зона сепарації (відділення краплин від повітря).

Застосування модульного підходу, а також можливість виготовлення апарата з будь-якою кількістю секцій дозволяють забезпечити необмежено широкий діапазон регулювання продуктивності декарбонізаційної установки.

Недоліком пристроїв даного типу є досить великі габарити і маса. Загальним недоліком декарбонізаторів є потреба індивідуального розрахунку з врахуванням конкретних умов внаслідок фактичної неповторюваності вихідних даних. Застосування декарбонізаторів для нейтралізації кислого конденсату пов'язане зі значними матеріальними та енергетичними витратами і тому не отримало практичного застосування. В Україні декарбонізатори все ще використовуються промисловістю для декарбонізації води з відносно невисоким вмістом вуглекислоти (як правило, до 20 мг/л).

В Інституті технічної теплофізики НАН України проводяться дослідження з метою розробки нового способу нейтралізації кислого конденсату, що ґрунтується на використанні фізичних впливів на оброблюване середовище і дозволяє уникати введення хімічних реагентів і характеризується низькими питомими енергетичними і матеріальними витратами. Нейтралізований таким чином кислий конденсат не міститиме розчинених солей і зможе повторного використовуватись в системі підготовки води для живлення котлів. Спосіб розробляється на базі фундаментальних досліджень в рамках наукового напрямку дискретно-імпульсного введення енергії (ДІВЕ) в дисперсні системи [7] з використанням таких механізмів як високочастотні гідродинамічні коливання, що супроводжуються високими окружними швидкостями і напруженнями зсуву, а також кавітаційні явища і швидкоплинні фазові переходи. Попередні дослідження показали, що водневий показник кислого конденсату зростає до 6,5 і залишається стабільним, а загальна жорсткість становила 0,01 мг-екв/дм³ до і після обробки.

На основі порівняння різних типів обладнання для нейтралізації кислого конденсату (обладнання для нейтралізації за допомогою твердого реагенту, автоматизованих пристроїв для рідинної нейтралізації, декарбонізаторів) попередньо встановлено, що загальні витрати на 1 тону нейтралізованого

конденсату, використовуючи запропонований спосіб будуть в 2-3 рази нижчі, порівняно з існуючим обладнанням [347].

Запропонований спосіб нейтралізації конденсату також має такі переваги перед існуючими способами нейтралізації як висока продуктивність на одиницю займаної площі, низька металоємність, відсутність використання хімічних реагентів і запобігання забрудненню довкілля.

1.4. Висновки до розділу, постановка мети і завдань дослідження

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

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

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

різноманітних чинників на оброблюване середовище. У зв'язку з цим дослідження кавітаційних процесів представляє значний науковий і практичний інтерес.

Враховуючи все вищезазначене, **мету даної роботи можна сформулювати наступним чином:** 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 **завдання:**

- 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 стисливій рідині з урахуванням ефектів сферичного гідравлічного удару; створити математичні моделі для розрахунку сопла Вентурі та РПА як кавітаційних реакторів для опису розподілу тиску і швидкості в потоці рідини;

- створити математичну модель для опису процесів деформації і руйнування дисперсій в зсувних течіях в зазорах роторно-пульсаційного апарата, 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.

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

РОЗДІЛ 2

СТВОРЕННЯ І ЗАСТОСУВАННЯ МОДЕЛЕЙ КАВІТАЦІЇ

2.1. Основні положення принципу дискретно-імпульсного введення енергії

В Інституті технічної теплофізики НАН України на основі узагальнення багаторічного наукового і практичного досвіду сформульовано концепцію якісно нового підходу до інтенсифікації масообмінних або гідромеханічних процесів в рідких гетерогенних середовищах. Цей підхід, відомий як принцип дискретно-імпульсного введення енергії (ДІВЕ), передбачає створення умов раціонального використання введеної в апарат енергії для виконання корисної роботи і максимального зниження непродуктивних енергетичних втрат [7–10, 348–352]. Методи ДІВЕ забезпечують раціональні шляхи перетворення введеної енергії в короткочасні імпульси високої потужності, дискретно розподілені в робочому об'ємі. Економія досягається за рахунок концентрування введеної енергії безпосередньо на поверхні окремих дисперсних часток, саме там, де необхідно виконати корисну роботу.

Під поняттям дисперсії мається на увазі тверда частинка або агрегація мікрочастинок, краплі іншої рідини, газові бульбашки, а також супрамолекулярні структури – молекули органічних чи неорганічних сполук, міцели, клітини мікроорганізмів тощо.

Одна з можливостей реалізації принципу ДІВЕ пов'язана зі створенням в рідинному дисперсному середовищі великої кількості рівномірно розподілених в об'ємі парових чи парогазових бульбашок – так званого «бульбашкового ансамблю» [353]. Поведінка будь-якої окремої бульбашки зумовлена впливом сусідніх бульбашок, а динамічна дія кожної бульбашки в локальній зоні оточуючої рідини розглядається з урахуванням колективної дії усіх бульбашок ансамблю. Якщо внаслідок швидкої зміни зовнішнього тиску в ансамблі створюються умови для інтенсивного росту, стиснення, пульсації та захлопування бульбашок, миттєві

значення тиску в локальних точках рідини, так само, як і миттєві значення векторів швидкості та прискорень, мають залежати від таких факторів, як концентрація бульбашок, їх розподіл за розмірами і взаємне положення на даний момент [7–9]. Враховується також силова взаємодія між бульбашками, яка веде до їх постійного взаємного переміщення в об'ємі і до певної деформації їхньої форми.

Усередині ансамблю бульбашок спостерігається хаотична картина безперервно змінюваних у часі і просторі полів швидкостей і тисків, а мікротечії в міжбульбашковому просторі мають складний вихровий характер. В процесі різкого зростання або стиснення сукупності бульбашок в околиці кожної з них формуються нестационарні мікропотоки, які інтенсифікують конвективний тепло- і масоперенос, а також динамічно впливають на дисперсні частинки аж до можливого їх руйнування [354].

Сукупність великого числа бульбашок, що динамічно розвиваються, є свого роду системою мікротрансформаторів, які перетворюють введену зовнішню енергію в потужні енергетичні імпульси, дискретно розподілені в просторі і в часі. При реалізації таких механізмів ДІВЕ використовується відомий принцип ударної дії, який лежить, наприклад, в основі роботи імпульсного лазера або динамічної дії кумулятивного струменя – повільна акумуляція порівняно невеликої кількості енергії та реалізація її за короткий проміжок часу в дуже малих локальних просторових зонах.

Високий рівень кінетичної енергії при динамічному розвитку бульбашок може бути досягнутий також за рахунок зміни внутрішньої енергії самої системи, що дозволяє суттєво знизити загальні витрати енергії [355, 356]. Економія стає тим відчутнішою, якщо попереднє акумулювання внутрішньої енергії зумовлено вимогами конкретної технології, такої як, наприклад, обов'язкова пастеризація молока в процесі гомогенізації, стерилізації, зміни фракційного складу білків молока тощо [357], або попередньої термовакуумної обробки біологічно-активних рідинних сумішей в харчовій та консервній галузях промисловості. Як показує теоретичний аналіз та досвід практичного використання методів ДІВЕ, одним з найважливіших

критеріїв їх ефективності є максимально швидка зміна зовнішнього тиску в системі. При виконанні цієї умови досягається найбільш повна та раціональна утилізація внутрішньої енергії.

Слід умовно розрізняти м'які і жорсткі механізми ДІВЕ, не проводячи між ними чіткої межі.

М'які механізми використовують для прискорення процесів міжфазного тепло- і масообміну та процесів перемішування багатокомпонентних середовищ.

Жорсткі механізми ДІВЕ доцільно застосовувати для стимулювання технологічних процесів, пов'язаних з руйнуванням твердих або рідких дисперсій, колоїдних частинок, міцелярних структур, клітин мікроорганізмів, а також з метою впливу на кінетику перебігу хімічних і біохімічних реакцій.

З урахуванням того, що динаміка окремих бульбашок та бульбашкових ансамблів визначає специфічний характер багатьох механізмів ДІВЕ, було виконано великий комплекс досліджень ТМО та ГД процесів у парорідинних бульбашкових системах. В межах цих досліджень такі процеси, як ізобаричне та ізотермічне кипіння рідини, вибухове закипання, течія закипаючих потоків, об'ємна конденсація, акустична, гідродинамічна, парова, лазерна кавітації, вперше розглядаються з єдиних термодинамічних позицій як один і той же процес фазового переходу "рідина-пара" за різних режимних умов.

Поведінка окремих бульбашок і бульбашкових структур у цих процесах описується загальною універсальною математичною моделлю, що враховує особливості трансформації енергії в структурах, що розвиваються, а також специфіку перебігу мікро- і наномасштабних процесів. Аналітичні дослідження, проведені на базі такого підходу, дозволили виявити та обґрунтувати нові невідомі раніше закономірності поведінки бульбашок у зазначених процесах.

При цьому поняття кавітації взагалі не розглядалося, тобто принцип ДІВЕ базується на загальних підходах до інтенсифікації тепломасообміну та стимуляції гідродинамічних процесів, які забезпечують мінімізацію енергетичних витрат. Можливість застосування для цього сукупності бульбашок, які динамічно

розвиваються, розглядається як окремий спосіб реалізації принципу ДІВЕ, з якого логічно випливає поняття кавітації.

2.1.1. Кавітація як потужний механізм ДІВЕ

Аналіз теоретичних основ принципу ДІВЕ показує, що кавітаційні механізми за своїми енергетичними показниками є найбільш ефективними. За можливістю їх реалізації в локальних зонах оброблюваного рідинного середовища можна створювати широкий спектр динамічної дії, починаючи від м'яких впливів в операціях перемішування або розчинення, до достатньо жорстких, здатних подолати високий рівень внутрішніх молекулярних енергетичних зв'язків.

При термодинамічному обґрунтуванні принципу ДІВЕ розглядаються два режими еволюції парогазової бульбашки – при поступовому змінненні температури рідини, або при раптовій зміні її тиску [7, 10].

В ізобаричному процесі ($p_l = \text{const}$) при підвищенні температури рідини бульбашки поступово зростають і при досягненні певної температури $T_{boil} = f(p_l)$ відбувається бурхливе (вибухове) термічне закипання рідини, яке супроводжується необмеженим і безповоротним зростанням бульбашок. При пониженні температури рідини до значень $T_l < T_{boil}$ розмір бульбашок поступово зменшується за рахунок конденсації присутньої в бульбашках пари на поверхні холодної рідини.

В ізотермічному процесі ($T_l = \text{const}$) при скиданні тиску в рідині бульбашки поступово зростають і при досягненні певного критичного значення тиску $p_{cr} = f(T_l)$ відбувається кавітаційне закипання рідини, яке, так само, як і при термічному закипанні, супроводжується необмеженим і безповоротним зростанням бульбашок. При наступному підвищенні тиску в рідині до значень $p_l > p_{cr}$ розмір бульбашок швидко зменшується за рахунок сумарної дії на поверхню бульбашок сили зовнішнього тиску p_l та наростаючого капілярного тиску $p_\sigma = 2\sigma/R$, пов'язаного з наявністю поверхневого натягу на міжфазній межі «рідина – газ».

При описі ізотермічного процесу термін «**кавітація**» тут застосовується умовно, як стадія еволюції парорідинної бульбашкової системи, на якій відбувається

стиснення бульбашок. Тобто, це стадія, тотожна стадії конденсації в ізобаричному процесі.

Відмінність між процесами термічного і кавітаційного закипання рідини полягає в тому, що кавітаційне (ізотермічне) закипання досягається шляхом практично миттєвого скидання тиску у всьому робочому об'ємі рідини до значень $p_l < p_{sat}(T_l)$, тоді як термічне (ізобаричне) закипання потребує тривалого часу нагрівання робочого об'єму рідини до значень $T_l < T_{boil}$.

Отже, поняття явища кавітації логічно впливає з положення концепції ДІВЕ без розгляду і деталізації ефектів кавітації та фізичної природи цього явища.

2.1.2. Апарати створені за принципом ДІВЕ

Практичне застосування методів ДІВЕ в різних технологічних процесах базується на таких механізмах, як прискорення несучої фази, використання зсувних напружень, ефекти вибухового закипання, колективні ефекти у бульбашковому ансамблі, кавітаційні ефекти тощо. На базі методів ДІВЕ і механізмів їх реалізації створено декілька класів апаратів, а саме:

- апарати адіабатного закипання;
- апарати термовакuumної обробки;
- газоімпульсні пульсатори колонного типу;
- пульсаційні апарати зі змінним робочим об'ємом;
- пульсаційні диспергатори з активною мембраною;
- пульсаційні екстрактори;
- пульсаційні ферментери;
- роторно-пульсаційні апарати циліндричного типу;
- роторно-пульсаційні апарати дискового типу;
- звужувально-розширювальні канали, сопла Вентурі.

У каталозі [359], виданому в 2025 році, представлено основні зразки розробленого в ІТТФ НАН України інноваційного обладнання та технологій і нові класи тепломасообмінних та гідромеханічних апаратів, створених на основі ДІВЕ.

У більшості пристроїв, створених на основі концепції ДІВЕ, таких як роторно-пульсаційні апарати (РПА), пульсаційні диспергатори, екстрактори і ферментери, обладнання для термовакuumної обробки та інші, визначальну роль відіграє саме кавітація, яка є одним з найбільш ефективних механізмів ДІВЕ.

Дослідження і застосування кавітаційних механізмів в апаратах ДІВЕ відкриває можливість розширення області використання цих пристроїв та їх ефективної експлуатації в різних технологіях, зокрема, в нано- та в біотехнологіях.

Різні типи кавітаційних апаратів, застосованих в технологіях ДІВЕ, об'єднують їх спроможність створювати одночасно в усьому робочому об'ємі дискретні імпульси з контрольованою енергетичною потужністю. Це дає можливість при розробці інноваційних технологій і відповідного обладнання спрямовано застосовувати як м'які режими кавітації для інтенсифікації процесів перемішування, гомогенізації та міжфазного тепломасообміну, так і жорсткі кавітаційні режими для стимулювання технологічних процесів, пов'язаних з руйнуванням твердих дисперсій, колоїдних частинок, міцелярних структур, клітин мікроорганізмів тощо, а також з метою спрямованого впливу на кінетику перебігу хімічних і біохімічних реакцій.

2.1.3. Напрямки розвитку концепції ДІВЕ

В межах розроблення теоретичних та теплофізичних основ ідеології принципу ДІВЕ послідовно опубліковано базові монографії [7–9, 360], в яких викладено фундаментальні положення цього принципу, як якісно нового підходу до створення енергозберігаючих технологій для різних галузей промисловості, розглянуто основні механізми та методи ДІВЕ, створення на їх основі нового класу масообмінних та гідромеханічних апаратів. Опубліковано монографії, присвячені окремим аспектам принципу ДІВЕ, зокрема і теоретичному обґрунтуванню механізмів ДІВЕ в апаратах адіабатного закипання [355, 356] та розробленню

моделей і методів розрахунку параметрів пульсаційного обладнання (РПА, пульсаційні диспергатори) [360–362], розробці кавітаційних технологій для виробництва нанопрепаратів [363].

На базі комплексних досліджень механізмів ДІВЕ створено математичні моделі динаміки одиничних бульбашок і сукупності бульбашок в парорідинних дисперсних системах [8, 353, 364] з метою аналізу механізмів ДІВЕ та кавітаційних ефектів.

Опубліковано низку праць присвячених застосуванню методів ДІВЕ для керування кінетикою перебігу нанорівневих процесів в дисперсних та супрамолекулярних системах [351, 365], а також для виробництва наноструктур [351, 366, 367], зокрема ліпосомних наноструктур з застосуванням ефектів ГД кавітації [368, 369]. Також опубліковано тематичний збірник наукових статей вчених ІТТФ НАН України присвячених фундаментальним та прикладним дослідженням застосування методів ДІВЕ у рідких гетерогенних середовищах [370].

Проведено комплексні дослідження по застосуванню методів ДІВЕ для створення інноваційних біотехнологій [352, 365, 371], одержання біопалив та водовугільних палив [366, 372, 373], а також для інтенсифікації процесів ферментації [352, 374] та екстрагування [375, 376]. В останні роки поширилися дослідження по застосуванню механізмів ДІВЕ в процесах водопідготовки, зокрема очищенню води від сторонніх нейтральних газів [377, 378], а також дослідження по нейтралізації конденсату продуктів згоряння природного газу з застосуванням методів ДІВЕ [379–381].

Основні положення концепції принципу ДІВЕ, поточні результати експериментальних та теоретичних досліджень по вивченню та обґрунтуванню його механізмів обговорювались на багатьох престижних міжнародних наукових конференціях [382–385], в тому числі регулярно оголошувались співробітниками ІТТФ НАН України на Мінських міжнародних форумах по тепломасообміну (ММФ) з 1986 по 2016 рр.

Концепція ДІВЕ набула широко визнання та поширення серед науковців і спеціалістів, як в Україні так і за її межами. В багатьох роботах по дослідженню ТМО і гідродинаміки закипаючих потоків, утворених в ГД кавітаційних реакторах, а також процесів акустичної та гідродинамічної кавітації застосовуються методи ДІВЕ з посиланням на фундаментальні роботи по ДІВЕ, виконані в ІТТФ НАН України.

Методи ДІВЕ застосовуються в наукових і учбових цілях, підготовці кандидатських та докторських дисертацій пов'язаних тематикою створення кавітаційних технологій. Основні положення принципу ДІВЕ, його теоретичні та теплофізичні засади входять у вигляді окремих розділів навчальних посібників за спеціальністю «Машини та апарати» в декількох провідних учбових закладах.

2.2. Математичні моделі кавітації, створені на основі концепції ДІВЕ

При розробленні теоретичних засад концепції ДІВЕ в ІТТФ НАН України в межах термодинаміки незворотних процесів було створено уніфіковану математичну модель динаміки одиничної бульбашки (модель ДОБ), яка без використання регулюючих параметрів дозволяє адекватно прогнозувати поведінку одиничної парової бульбашки при зміні зовнішнього тиску [7, 365]. Було виявлено, що поведінка бульбашок радикально залежить від того, зростає чи спадає тиск в рідині і кінетика фазового переходу «рідина-пара» має визначальне значення в цих явищах.

На основі цієї моделі було побудовано математичну модель динаміки ансамблю парових бульбашок (модель ДБА), яка описує еволюцію сукупності парових бульбашок в результаті швидкої зміни зовнішнього тиску з урахуванням силової та термічної взаємодії між бульбашками [7, 386]. В наближенні коміркової моделі розраховано усереднений по ансамблю тиск в рідині в міжбульбашковому просторі ансамблю. Встановлено, що швидкість росту або захоплення бульбашок у цих явищах контролює зміну середнього тиску. Модель ДБА призначена також для аналізу структури мікропотоків у міжбульбашковому просторі, що дозволяє

детально описати в мікроскопічному масштабі швидкозмінні поля тиску, швидкості і температур всередині ансамблю.

Обидві моделі в рамках однієї системи рівнянь при мінімальному числі припущень і без застосування регулюючих параметрів описують поведінку сферичних бульбашок у процесах кипіння, а також у процесах ГД, парової та акустичної кавітації у всьому температурному інтервалі існування рідинної фази аж до критичної точки. Особливістю моделей є опис міжфазного тепло- та масообміну в рамках молекулярно-кінетичної теорії, а також подання в аналітичному вигляді емпіричних залежностей від температури основних теплофізичних характеристик обох фаз. Достовірність моделей підтверджено багатократною апробацією на експериментальних даних різних авторів.

Ці моделі успішно використовувалися для розрахунку кавітаційних реакторів різного типу під час вирішення конкретних технологічних задач [94, 130, 165, 284]. За допомогою моделі можна проаналізувати вплив різних факторів на процес кавітації. На сьогодні 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.

2.2.1. Система рівнянь моделі динаміки одичної бульбашки

Модель ДОБ містить систему диференціальних рівнянь з відповідними початковими умовами та замикаючих систему алгебраїчних рівнянь, а також співвідношення, що апроксимують емпіричні температурні залежності теплофізичних параметрів. Передбачається, що у всіх випадках відома температура T_{l0} рідини та початковий рівноважний тиск у рідині p_{l0} . Наступна зміна тиску протягом певного проміжку часу Δt до заданої кінцевої величини тиску p_{lf} визначає подальшу поведінку бульбашки. В умовах термодинамічної рівноваги значення p_{l0} і T_{l0} визначають початкові умови для температури, густини і тиску пари та газу всередині бульбашки. Якщо бульбашка містить лише пару, то початковий радіус

бульбашки R_0 однозначно визначається з умови $p_v = p_{sat}(T_0) = p_{l0} + 2\sigma/R_0$. При наявності в бульбашці відомої кількості нейтрального газу m_g початковий радіус рівноважного бульбашки залежатиме також і від парціального тиску газу $p_g = 3m_g BT_{l0}/4\pi R_0^3 M_g$, так що значення R_0 можна варіювати в певних межах, задаючи значення m_g (або p_{g0}). Тоді R_0 визначається за умови $p_g + p_{sat}(T_{l0}) = p_{l0} + 2\sigma/R_0$. На стадії зростання парогазових зародків початковий вміст газу практично не впливає на подальшу поведінку зростаючої бульбашки. Однак для колапсуючих бульбашок вміст газу в бульбашці стає визначальним фактором і навіть відносно невелика кількість стороннього газу в бульбашці докорінно впливає на характер її колапсу.

Нижче наведено основні рівняння моделі ДОБ [7, 365].

Диференціальні рівняння

Зміна швидкості радіального руху рідини біля поверхні бульбашки

$$\frac{dw_R}{d\tau} = \frac{p_b - p_\infty - 1,5\rho_l \cdot w_R^2 - \frac{2\sigma}{R} - \frac{4\mu_l \cdot w_R}{R}}{\rho_l \cdot R}. \quad (2.1)$$

Зміна радіуса бульбашки

$$\frac{dR}{d\tau} = w_R + \frac{j}{\rho_l}. \quad (2.2)$$

Зміна температури парогазового середовища в бульбашці

$$\frac{dT_b}{d\tau} = \frac{3}{(\rho_g \cdot c_g + \rho_v \cdot c_v)} \cdot \left(q - j \cdot c_v \cdot T_b - p_b \cdot \frac{dR}{d\tau} \right). \quad (2.3)$$

Зміна густини нейтрального газу в бульбашці

$$\frac{d\rho_g}{d\tau} = -\frac{3\rho_g}{R} \frac{dR}{d\tau}. \quad (2.4)$$

Зміна густини пари в бульбашці

$$\frac{d\rho_v}{d\tau} = -\frac{3}{R} \left(j - \rho_v \cdot \frac{dR}{d\tau} \right). \quad (2.5)$$

Зміна кількості теплоти, переданої бульбашці

$$\frac{dH_l}{d\tau} = -4\pi R^2 \cdot [j \cdot L(T_s) - q]. \quad (2.6)$$

Початкові умови:

$$w_R(0) = w_{R0}; R(0) = R_0; T_b(0) = T_{b0}; \rho_v(0) = \rho_{v0}; \quad (2.7)$$

$$\rho_g(0) = \frac{m_g}{4/3 \cdot \pi R^3}; H_l(0) = H_{l0}.$$

Алгебраїчні рівняння

Тиск газу в бульбашці

$$p_g = \frac{B \cdot \rho_g T_b}{m_g - \rho_g \cdot b_g} - \frac{a_g \cdot \rho_g^2}{M_g^2}. \quad (2.8)$$

Тиск пари в бульбашці

$$p_v = \frac{B \cdot \rho_v T_b}{M_v - \rho_v \cdot b_v} - \frac{a_v \cdot \rho_v^2}{M_v^2}. \quad (2.9)$$

Тиск парогазового середовища в бульбашці

$$p_b = p_g + p_v. \quad (2.10)$$

Швидкість міжфазного масопереносу

$$j = 0,25\alpha_m \cdot [\rho_s \cdot u_s(T_s) - \rho_v \cdot u_v(T_b)]. \quad (2.11)$$

Швидкість міжфазного теплопереносу

$$q = 0,25 \cdot (\rho_v \cdot u_v \cdot c_v - \rho_g \cdot u_g \cdot c_g) \cdot (T_s - T_b) + j \cdot c_v \cdot T_s. \quad (2.12)$$

Швидкість молекулярно-кінетичного руху молекул пари і газу

$$u_v(T_b) = (8BT_b/\pi M_v)^{0,5}; \quad u_v(T_s) = (8BT_s/\pi M_v)^{0,5}; \quad (2.13)$$

$$u_g(T_b) = (8BT_b/\pi M_g)^{0,5}.$$

Рівняння балансу теплоти

$$(T_0 - T_s) \cdot \lambda_l \cdot \left(\frac{2}{\delta} + \frac{1}{R} \right) = -j(T_s) \cdot L(T_s) - q(T_s). \quad (2.14)$$

Зміна ентальпії в тепловому шарі в рідині в околиці бульбашки

$$\frac{dH_l}{d\tau} = -4\pi R^2 [jL(T_s) - q]. \quad (2.15)$$

Поточна товщина теплового граничного шару

$$\delta = 2R \cdot \left(\sqrt{1 + \frac{3H_l}{4\pi R^3 \rho_l c_l (T_s - T_l)}} - 1 \right). \quad (2.16)$$

Система наведених вище рівнянь доповнена рівняннями, які відображають емпіричні температурні залежності теплофізичних параметрів рідини, пари і газу. Розглянута тут модель динаміки одиничної бульбашки здатна адекватно описувати поведінку парогазових бульбашок не тільки у воді, але і в будь-якій іншій рідині, якщо отримано емпіричні співвідношення для точного опису залежності відповідних теплофізичних параметрів від температури.

Рівняння (2.1), що описує радіальний рух рідини на межі зі сферичною бульбашкою під час її зростання або стискання при зміні зовнішнього тиску було виведено в контексті розвитку теоретичних засад принципу ДІВЕ з використанням рівняння руху Нав'є–Стокса. При виведенні цього рівняння послідовно було враховано вплив капілярних сил та сил в'язкості, в результаті чого одержане рівняння звелось до вигляду відомого рівняння Релея–Плесета, яке представлено в першому розділі дисертації як рівняння (1.4)

Рівняння Релея–Плессета (2.1) вирішується спільно з рівняннями, котрі описують зміну температури та тиску пари в бульбашці, теплообмін бульбашки з рідиною, кінетику фазових переходів з урахуванням зміни температури рідини на межі з бульбашкою та температурні залежності густини, в'язкості рідини та поверхневого натягу.

2.2.2. Система рівнянь моделі динаміки ансамблю бульбашок

Рівняння (2.1) – (2.16) використовується також у системі рівнянь динаміки бульбашок кавітаційного кластера в моделі ДБА [386]. Крім зазначених вище рівнянь система рівнянь моделі ДБА повинна містити також рівняння, які описують силову та термічну взаємодію бульбашок, що дозволяє розраховувати поточні

нестационарні поля швидкостей, температур і тисків у рідині в міжбульбашковому просторі кластера, де присутні дисперсії та супрамолекулярні структури, які підлягають кавітаційній обробці.

Для адекватного опису кавітаційних механізмів необхідний суворий облік усіх зазначених факторів. Однак, навіть у найбільш розроблених моделях реакторів опис процесів кавітації проводиться з великою кількістю спрощуючих припущень, таких як ізотермічність процесу, сталість тиску пари в бульбашці, відсутність взаємодії бульбашок кластера тощо [2, 124, 172, 186, 192]. У ряді випадків розрахунки проводяться для одиначної бульбашки, а при аналізі поведінки кластера вводиться не виправдано велика кількість емпіричних чи регулюючих параметрів [3, 128, 387, 388]. На думку авторів робіт [6, 15, 202, 388] досі не розроблені теоретичні основи, що дозволяють ідентифікувати ключові параметри кавітації, а проблема дослідження механізмів кавітації фактично зводиться до тестування поведінки «чорної скриньки» [389].

Розглянемо коротко принцип моделювання поведінки окремої бульбашки в ансамблі бульбашок (модель ДБА), який базується на усередненні тиску в усьому міжбульбашковому просторі рідини. Нехай у нескінченному об'ємі рідини з початковою температурою T_{l0} рівномірно розподілені парові бульбашки однакового розміру, що знаходяться в термодинамічній рівновазі з рідиною. Початковий тиск пари всередині кожної бульбашки $p_{v0} = p_{sat}(T_{l0})$. Тиск, що діє з боку рідини на зовнішню поверхню кожної бульбашки в ансамблі визначається з умови $p_{l0} = p_{sat}(T_{l0}) - 2\sigma/R$. Кількість бульбашок в одиниці маси системи N_b є відомою заданою величиною, яка залишається постійною в процесі подальшої еволюції системи, тобто виключаються ефекти коагуляції і дроблення бульбашок. У момент часу $\tau = 0$ діючий на систему зовнішній тиск $p_\infty = p_{l0}$ починає змінюватися за відомим законом, ініціюючи зростання або стискання усіх бульбашок ансамблю.

Об'ємний паровміст пов'язаний з концентрацією бульбашок N_b і їхнім поточним радіусом $R(\tau)$ для монодисперсної системи визначається виразом

$$\beta = \frac{4\pi R^3 N_b \rho_l}{3 + 4\pi R^3 N_b \rho_l}. \quad (2.17)$$

В околиці кожної бульбашки в межах елементарної комірки з радіусом $\xi(\tau) = R(\tau)/\beta^{0,33}$ виникає сферично-симетричний розподіл тиску, який описується рівнянням

$$p_l(r, \tau) = p_R - \rho_l \left(\frac{p_R - p_c + 0,5\rho_l w_R^2 (1 - \beta^{1,33})}{1 - \beta^{0,33}} \right) \cdot \left(1 - \frac{R}{r} \right) + 0,5\rho_l w_R^2 \left(1 - \frac{R^4}{r^4} \right), \quad (2.18)$$

яке при $r = \xi$ зводиться до рівняння, що визначає тиск на зовнішній межі комірки

$$p_c \equiv p_l(\xi, \tau) = p_R - \rho_l \left(R \frac{dw_R}{d\tau} + 2w_R^2 \right) \cdot (1 - \beta^{0,33}) + 0,5\rho_l w_R^2 \cdot (1 - \beta^{1,33}). \quad (2.19)$$

Рівняння (2.18) дозволяє розрахувати тиск у будь-якій точці рідини в межах комірки, якщо визначено тиск на її зовнішній межі. Середній тиск у рідині в межах комірки визначаємо шляхом інтегрування правої частини (2.18) по об'єму рідини в комірці та подальшого поділу на цей об'єм. В результаті одержимо

$$\bar{p}_l(\tau) = p_c + \frac{\rho^{0,33} [p_R - p_c + 0,5\rho_l w_R^2 (1 - \beta^{1,33})]}{1 - \beta^{0,33}} \cdot \left[\frac{1,5(1 - \beta^{0,66})}{1 - \beta} - 1 \right] - 0,5\rho_l w_R^2 \cdot \left(\frac{3\beta \cdot (1 - \beta^{0,33})}{1 - \beta} - \beta^{1,33} \right). \quad (2.20)$$

Усереднення відноситься як до об'єму елементарної комірки, так і до всього об'єму рідини в міжбульбашковому просторі.

В рівняннях (2.18) – (2.20) член p_R , згідно з рівнянням (1.2) розділу 1, визначає тиск рідини на межі бульбашки, який пов'язаний з тиском парогазового середовища всередині бульбашки p_b рівнянням $p_R = p_b - 2\sigma/R - 4\mu_l \cdot w_R/R$.

При зміні паровмісту бульбашкової системи температура рідини змінюється внаслідок виділення чи поглинання теплоти фазових переходів на міжфазній поверхні. Середню температуру рідкої фази в ансамблі парогазових бульбашок можна ототожнити з середньою температурою рідини в елементарній комірці. Як зазначалося вище, в комірковій моделі передбачається, що кожна елементарна

комірка теплоізолювана. Тому кількість тепла, передана через поверхню бульбашки в результаті фазового переходу і теплообміну, однозначно визначає зміну вмісту рідини в комірці і її середньої температури. Виконуючи необхідні перетворення, отримаємо просте рівняння для визначення середньої температури рідини в міжбульбашковому просторі ансамблю

$$\frac{d\bar{T}_l}{d\tau} = \frac{N_b(jL + q)}{c_l}. \quad (2.21)$$

Алгебраїчні рівняння (2.17) – (2.21) доповнюють систему рівнянь динаміки одиничної бульбашки в моделі ДОБ. Єдиним новим входним параметром моделі ДБА є концентрація бульбашок в одиниці маси системи $N_b = \text{const}$.

Таким чином система рівнянь моделі ДБА містить рівняння (2.1) – (2.21), тобто, як і модель (ДОБ) потребує вирішення тих самих шести диференціальних рівнянь (2.1) – (2.6).

2.2.3. Модифікація моделей

2.2.3.1. Врахування стисливості рідини

В рамках запланованих в дисертаційній роботі досліджень по динаміці кавітаційних бульбашок проведено модифікацію застосованих моделей ДОБ та ДБА з врахуванням стисливості рідини.

Хоча оригінальна версія рівняння Релея-Плессета у формі рівняння (2.1) точно описує початкову фазу росту та наступного колапсу парогазової бульбашки, вона не може навіть якісно описати затухаючі відскоки осцилюючої бульбашки на стадії її захоплення. Модель Релея-Плессета не враховувала вплив стисливості рідини, який істотно впливає на радіальний рух кавітаційної бульбашки в кінцеві моменти, коли швидкість стінки бульбашки досягає екстремальних значень і може навіть перевищувати швидкість звуку в середовищі [262]. Стисливість рідини має тенденцію зменшувати швидкість колапсу, але головне значення стисливості рідини полягає саме в її ролі в утворенні ударних хвиль під час фази відскоку, що настає після колапсу [390]. Для інтенсивних колапсів бульбашок тиск в області рідини

поблизу бульбашки може досягати значень порядку тисяч атмосфер і тоді вплив стисливості в рідині стає важливим [391]. Припущення про нестисливість рідини не враховує випромінювання ударних хвиль у навколишньому середовищі під час осциляції бульбашок, що вносить розбіжність між теорією і результатами експерименту [392]. Помилки доволі значні для дуже сильних колапсів, де випромінювання ударної хвилі з бульбашки відіграє головну роль у затуханні [393]. Інші припущення, зроблені в початковій моделі, що стосуються впливу в'язкості, поверхневого натягу, фазових переходів, хімічних реакцій є сумнівними [394].

Протягом останніх років у роботах різних авторів [394–400] проведено критичний аналіз існуючих моделей динаміки бульбашок, які для врахування стисливості рідини вносять в рівняння Релея–Плесета різної форми поправки «першого порядку» за числом Маха поблизу стінки бульбашки.

Як зауважено в роботах [396, 398] жодна форма рівняння Релея–Плесета не може правильно моделювати затухаючі відскоки осцилюючої бульбашки без використання емпіричних підгоночних параметрів. Для сильних колапсів бульбашок такі механізми, як затухання, що виникає внаслідок випромінювання ударних хвиль під час колапсу, не враховуються вищезгаданими поправками [393].

В роботі [401], виконаною за участю здобувача, з застосуванням принципово нового підходу представлено модифіковане рівняння Релея–Плесета з урахуванням стисливості рідини, яке без введення будь яких емпіричних регулюючих параметрів з достатньою точністю описує затухаючі відскоки осцилюючої бульбашки на стадії колапсу. Процес захлопування кавітаційної бульбашки в стисливій рідині вперше розглянуто як затухаючі коливання при сферичному гідравлічному ударі.

В наступному підрозділі 2.3 детально розглянуто розвиток та сучасний стан досліджень динаміки кавітаційних бульбашок в стисливій рідині, а також основні положення та рівняння запропонованої нами модифікації моделі Релея–Плессета за матеріалами роботи [401].

2.2.3.2. Моделювання кінетики кавітаційного закипання рідини. Активация газових мікрозародків

В рівнянні (2.1) параметр p_b в правій частині означає тиск парогазової суміші всередині бульбашки, який згідно з рівнянням (2.10) є сумою парціальних тисків газу та пари ($p_b = p_g + p_v$). Для проведення за рівняннями моделі ДОБ розрахунку поведінки бульбашки в результаті швидкого скидання тиску в рідині треба задати в рівнянні (2.7) радіус початково рівноважної бульбашки R_0 , а також визначити, до якого кінцевого мінімального значення $p_{\infty \min}$ і за який проміжок часу Δt необхідно скинути початково рівноважний тиск $p_{\infty}(0)$, щоб гарантовано забезпечити активацію бульбашки даного рівноважного розміру та її подальшу еволюцію. При цьому слід задати також і значення температури в рідині $T_l = \text{const}$. [402].

В наступному підрозділі 2.4 як модифікацію моделі ДОБ детально розглянуто процеси початкової стадії кавітації – закипання рідини при різкому скиданні в ній тиску. Зазначено аналогію між кавітаційним (ізотермічним) закипанням рідини та термічним (ізобаричним) закипанням. Представлено процедуру виведення рівнянь критичного тиску та критичного радіусу активованих бульбашок, які доповнюють базові рівняння моделі ДОБ. Показано, що ці рівняння застосовуються також і в моделі ДБА.

2.2.3.3. Моделі гідродинаміки каналу

Як показано в розділі 1 модель гідродинаміки каналу описує зміну тиску в рідині $p_{\infty} = f(\tau)$ у фіксованому елементарному об'ємі рідини за час її проходження через канали змінної геометрії у будь-якому кавітаційному реакторі. Розраховані в моделі ДОБ значення p_{∞} входять в рівняння (2.1) як аналітична залежність $p_{\infty} = f(\tau)$, що забезпечує можливість чисельного розв'язання цього рівняння.

В дисертаційній роботі як стаціонарний ГДКР застосовуються сопла Вентурі заданої геометрії, а як ротаційний ГДКР – циліндричні роторно-пульсаційні апарати (РПА) заданої конструкції. Для кавітаційних реакторів типу сопла Вентурі

залежність $p_{\infty} = f(\tau)$ розраховується з використанням рівняння Бернуллі [2, 3, 10–12]. Особливі труднощі викликає теоретичний опис процесів в РПА.

Моделювання нестационарних гідродинамічних процесів у РПА пов'язано зі специфічними труднощами, зумовленими складністю конструкції таких пристроїв і необхідністю враховувати вплив різноманітних чинників на оброблюване середовище [3, 4, 403]. Динамічна обробка дисперсної рідинної суміші, що проходить через канали і зазори РПА відбувається під дією двох факторів. В каналах ротора і статора при їх періодичному перекритті створюються типові ефекти кавітації – формування, зростання та колапс бульбашок, а також виникають ефекти вихореутворення, які важко дослідити в експерименті і дати їх теоретичний опис. У вузьких міжциліндрових зазорах з високою тангенціальною швидкістю рідинної суміші основний динамічний вплив на присутні дисперсії створюють потужні зсувні напруження, під дією яких відбувається деформування та руйнування рідинних і газових дисперсій, а також роздрібнення твердих агломератів.

В розділі 2.5 детально розглянуто моделювання сопел Вентурі, виведено формули для розрахунку сопла Вентурі заданої геометрії для різних робочих режимів з урахуванням гідродинамічних опорів на всіх ділянках каналу. Наведено рівняння розрахунку масової витрати рідини через сопло Вентурі для стаціонарного режиму його роботи.

В розділі 2.6 послідовно проведено моделювання кавітаційних процесів в радіально спрямованих каналах ротора і статора РПА, а також моделювання динамічної дії зсувних напружень, які є потужним жорстким механізмом принципу ДІВЕ.

Наведено систему алгебраїчних рівнянь математичної моделі течії рідини через радіальні канали РПА, що описують періодичну зміну тисків в локальних точках каналу на вході і на виході роторів та статора, а також поточні значення масової витрати рідини через канали РПА.

Проведено моделювання процесів деформування та руйнування рідких та газових дисперсій в зсувних течіях в міжциліндрових зазорах РПА. Пояснено механізм так званого вибухового розтягування та руйнування крапель та газових бульбашок в зсувних течіях. Вперше встановлено критерій незворотної деформації та наступного руйнування рідинних та газових дисперсій в зсувних течіях, який не залежить ні від теплофізичних властивостей суцільної та дисперсної фаз, ні від режимних параметрів роботи РПА.

2.3. Моделювання динаміки кавітаційних бульбашок в стисливих рідинах

2.3.1. Сучасний стан досліджень динаміки бульбашок в стисливій рідині

Наразі встановлено, що ефекти кавітації неможливо адекватно передбачити без належного врахування стисливості рідини. Моделі, що описують динаміку бульбашки в нестисливій рідині приводять до деяких неправдоподібних висновків.

По-перше, оскільки в нестисливій рідині збурення розповсюджується миттєво, необмежене зростання тиску при захлопуванні бульбашки відбувається у всьому об'ємі оточуючої рідини одночасно, що виключає можливість утворення високоамплітудних ударних хвиль, які спричиняють руйнування дисперсій [1, 260, 406].

По-друге, в процесі стиснення бульбашки з наступним її колапсом кінетична енергія радіального руху рідини повністю переходить в потенціальну енергію максимально стисненої бульбашки. При наступному розширенні максимально стисненої бульбашки її потенціальна енергія знову переходить в кінетичну енергію руху рідини, яка, в свою чергу, трансформується в потенціальну енергію максимально розширеної бульбашки. Далі процес осциляції бульбашки повторюється, причому в кожному циклі коливань відбувається деяка, доволі незначна, дисипація механічної енергії, спричинена дією сил в'язкості та передачею теплоти. Як наслідок, в нестисливій рідині бульбашка до свого кінцевого колапсу здійснює велику кількість повільно затухаючих пульсацій, що суперечить

результатам відомих експериментів, згідно з якими осцилююча бульбашка здійснює від 4 до 10 коливань до кінцевого захлопування.

В якості прикладу на рис. 2.1 за даними роботи [404] представлена експериментальна крива зміни радіуса парогазової бульбашки за час її проходження з потоком води через дифузор сопла Вентурі в процесі ГД кавітації.

На рис. 2.2 за даними [405] наведено визначену в експерименті залежність від часу радіуса осцилюючої бульбашки, що здійснює періодичні коливання в акустичному полі в кавітаційному режимі. На рисунку показано затухаючу пульсацію бульбашки до кінцевого захлопування протягом одного періоду коливань УЗ поля. В обох наведених прикладах кількість циклів осциляції бульбашки до повного затухання не перевищує десяти.

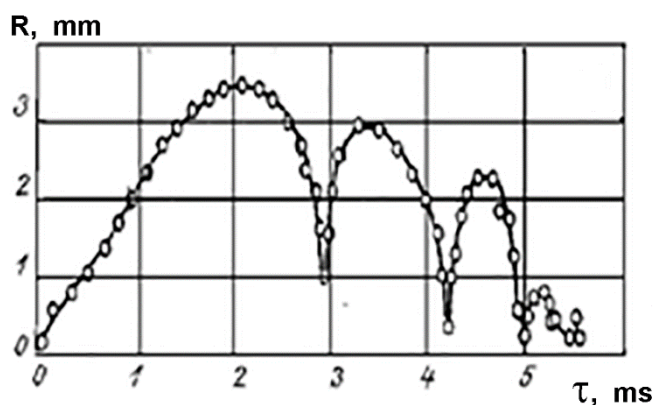


Рис. 2.1. Результати експерименту по захлопуванню бульбашки в потоці води в кавітаційній трубці типу сопла Вентурі. За даними роботи [404].

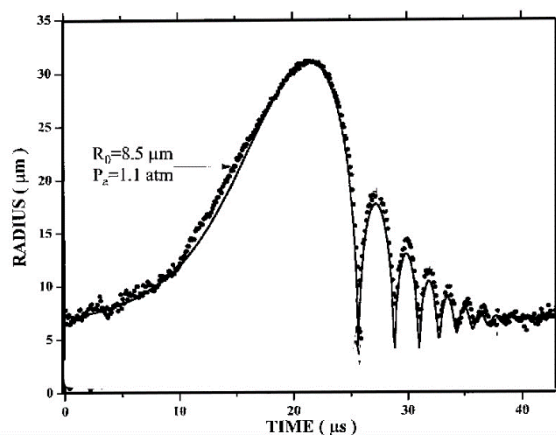


Рис. 2.2. Результати експерименту по захлопуванню бульбашки в УЗ полі протягом одного періоду коливань поля. За даними роботи [260].

Незважаючи на успіхи, досягнуті останніми роками в області швидкісної відеозйомки та голографії, експерименти поки-що не можуть надати потрібну інформацію про завершальну стадію захлопування бульбашки в масштабі наносекунд, оскільки результати обмежені роздільною здатністю у просторі та часі, відповідно, порядку 1 мкм та 0,1 мкс [405].

В існуючих моделях кавітації, що описують динаміку одиничної бульбашки, як базове рівняння руху використовується класичне рівняння Релея–Плесета, яке було виведене без урахування стисливості рідини.

В роботі [406] висунуто гіпотезу, що помітне затухання осцилюючих бульбашок походить від найбільш стисливої частини системи, якою є газ, а стисливість рідини відіграє другорядну роль. На думку авторів затухання виникає через неоднорідне поле тиску всередині бульбашки, що швидко стискується або розширюється. Однак теоретичні розрахунки по запропонованій авторами моделі дають значно менші затухання, ніж ті, що спостерігаються в експериментах.

В даний час існує набір наближених рівнянь, у яких застосовано різні модифікації рівняння Релея–Плесета, що враховують ефекти стисливості, і які використовуються для дослідження динаміки одиночних бульбашок у процесах гідродинамічної та акустичної кавітації [258–260, 407–415]. Ці рівняння мають однаковий ступінь точності і повністю еквівалентні за формальними ознаками, але не мають чіткого зв'язку один з одним. В роботі [1] зазначено, що жодна форма модифікації рівняння Релея–Плесета з урахуванням стисливості рідини не може правильно моделювати затухаючі відскоки бульбашки без використання нефізичних значень в'язкості та поверхневого натягу.

Просперетті і Лецці [260, 407] провели детальний аналіз існуючих рівнянь, що враховують стисливість рідини і довели, що існують цілі сімейства рівнянь, які мають однаковий ступінь точності і тому повністю еквівалентні з формальних міркувань. Зокрема, виявлено, що рівняння Херрінга–Флінна [411], Кірквуда–Бете [412], Гілмора [414], Келлера і Колоднера [258] та Келлера і Міксіса [259] є різними членами сімейства рівнянь першого порядку.

Теоретичне дослідження рівняння коливань бульбашки можна класифікувати за порядком числа Маха $Ma = c_{ac}^{-1} \cdot dR/d\tau$. Для нульового порядку наближення числа Маха рівняння бульбашки для стисливої рідини ($c_{ac} \rightarrow \infty$) спрощується до рівняння Релея–Плесета. На основі цього підходу рівняння Келлера і Міксіса [259] є рівнянням першого порядку, яке записується у вигляді:

$$\begin{aligned} & \left(1 - c_{ac}^{-1} \frac{dR}{d\tau}\right) \cdot R \frac{d^2 R}{d\tau^2} + \frac{3}{2} \left(1 - \frac{1}{3} c_{ac}^{-1} \frac{dR}{d\tau}\right) \cdot \left(\frac{dR}{d\tau}\right)^2 = \\ & = \left(1 + c_{ac}^{-1} \frac{dR}{d\tau}\right) \cdot \frac{1}{\rho_\infty} \left[p_b(\tau) - p_\infty - p_v \left(\tau + \frac{R}{c_{ac}} \right) \right] + \frac{R}{\rho_\infty c_{ac}} \cdot \frac{dp_b(\tau)}{dv}, \end{aligned} \quad (2.22)$$

де $p_v(\tau)$ – змінна частина тиску в рідині в місці розташування центру бульбашки при відсутності самої бульбашки. Це рівняння є правильним до першого порядку числа Маха.

В рівняння Херрінга-Флінна [411] застосовано поправку першого порядку для стисливості рідини $Ma = c_{ac}^{-1} \cdot dR/d\tau$ за умови, що при колапсі бульбашки число Маха значно менше одиниці. Нехтуючи при цьому будь-яким неконденсованим газом або тепловими ефектами, Херрінг також ввів у вихідне рівняння два емпіричних підгоночних параметри. Рівняння, знайдене за допомогою цієї процедури, має вигляд

$$\begin{aligned} & \left(1 - 2c_{ac}^{-1} \frac{dR}{d\tau}\right) \cdot R \frac{d^2 R}{d\tau^2} + \frac{3}{2} \left(1 - \frac{4}{3} c_{ac}^{-1} \frac{dR}{d\tau}\right) \cdot \left(\frac{dR}{d\tau}\right)^2 = \\ & = \frac{1}{\rho_\infty} \left[p_b(\tau) - p_\infty - p_v \left(\tau + \frac{R}{c_{ac}} \right) + \frac{R}{c_{ac}} \cdot \frac{dp_b(\tau)}{dv} \right]. \end{aligned} \quad (2.23)$$

При швидкостях радіального руху стінки бульбашки $dR/d\tau \approx c_{ac}$ рівняння (2.23) дає лише якісну картину процесу захоплення бульбашки.

Кірквуд і Бете [412] запропонували гіпотезу, яка дозволяє розглядати рух стінки кавітаційної бульбашки практично з будь якою швидкістю. Згідно припущенню цих авторів в момент колапсу бульбашка випромінює сферичні хвилі скінченної амплітуди, які при розповсюдженні в рідині трансформуються в ударні хвилі. Гілмор [413] на основі наближення Кірквуда-Бете вивів рівняння швидкості руху бульбашки, яке має вигляд

$$\begin{aligned} & \left(1 - c_\infty^{-1} \frac{dR}{d\tau}\right) \cdot R \frac{d^2 R}{d\tau^2} + \frac{3}{2} \left(1 - \frac{1}{3} c_\infty^{-1} \frac{dR}{d\tau}\right) \cdot \left(\frac{dR}{d\tau}\right)^2 = \\ & = \left(1 + c_\infty^{-1} \frac{dR}{d\tau}\right) \cdot H + \left(1 - c_\infty^{-1} \frac{dR}{d\tau}\right) \cdot \frac{R}{c_{acv}} \frac{dH}{d\tau}, \end{aligned} \quad (2.24)$$

де $H = \int_{p_\infty}^{p(r,\tau)} dp/\rho$ – термодинамічна різниця ентальпії між тиском на поверхні бульбашки та тиском рідини на нескінченності. Метод, запропонований в роботі [412] і розвинений Гілмром [413], дозволяє розглядати рух стінки осцилюючої бульбашки при високих швидкостях стінки аж до $dR/d\tau \approx 2,2c_{ac}$ [1, 260, 414].

Томіта і Шима [415] вивели рівняння руху сферичної бульбашки у в'язкій стисливій рідині враховуючи густину газу всередині бульбашки, вплив стисливості рідини на зміну її радіуса, а також максимальний імпульсний тиск, що супроводжує колапс бульбашки. Чисельно визначено розподіл тиску в рідині під час захлопування та осциляції бульбашки і з'ясовано зв'язок між максимальним імпульсним тиском та власною частотою бульбашки. Рівняння, що описує радіальний рух стінки бульбашки зводиться до вигляду

$$\begin{aligned} & \left(1 - 2c_{ac}^{-1} \frac{dR}{d\tau} + \frac{23}{10} \left(c_{ac}^{-1} \frac{dR}{d\tau}\right)^2\right) \cdot R \frac{d^2 R}{d\tau^2} + \frac{3}{2} \left(1 - \frac{4}{3} c_{ac}^{-1} \frac{dR}{d\tau} + \frac{7}{5} \left(c_{ac}^{-1} \frac{dR}{d\tau}\right)^2\right) \cdot \left(\frac{dR}{d\tau}\right)^2 = \\ & = \left[\frac{p_{lR} - p_{l\infty}}{\rho_l} \left(1 - \frac{3}{2} \left(\frac{p_{lR} - p_{l\infty}}{\rho_l \cdot c_{ac}^2}\right) + \frac{1}{2} \left(c_{ac}^{-1} \frac{dR}{d\tau}\right)^2\right) + \right. \\ & \quad \left. + \left(1 - 2c_{ac}^{-1} \frac{dR}{d\tau}\right) \cdot \frac{R(\tau)}{\rho_l c_{ac}} \frac{dp_l(\tau)}{dv} \right]_{r=R}. \end{aligned} \quad (2.25)$$

В аналізі рівнянь динаміки бульбашок з урахуванням стисливості рідини [407, 416] рівняння (2.25) визначається як рівняння другого ступеня точності завдяки наявності другого порядку числа Маха $[(dR/d\tau)/c_{ac}]^2$.

Очевидно, що у нестисливій рідині, коли $c_{ac} \rightarrow \infty$, і відповідно $Ma = 0$, рівняння (2.22) – (2.25) спрощуються до нульового рівня, тобто зводяться до рівняння Релея–Плесета. На думку авторів [260, 407] на питання, який член цього сімейства рівнянь є найточнішим, неможливо відповісти в абсолютних термінах, оскільки ці рівняння будувалися на різних фізичних підходах до механізму розповсюдження акустичних хвиль в рідині

Ці висновки в певній мірі підтверджуються графіками представленими на рисунках 2.3 і 2.4.

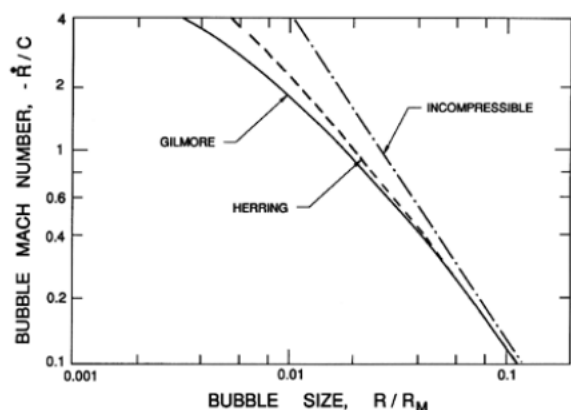


Рис. 2.3. Залежність числа Маха поверхні бульбашки від початкового радіуса бульбашки для різниці тисків в моделі Херрінга [411], Гілмора [413] та в нестисливій рідині [253]. За даними роботи [1].

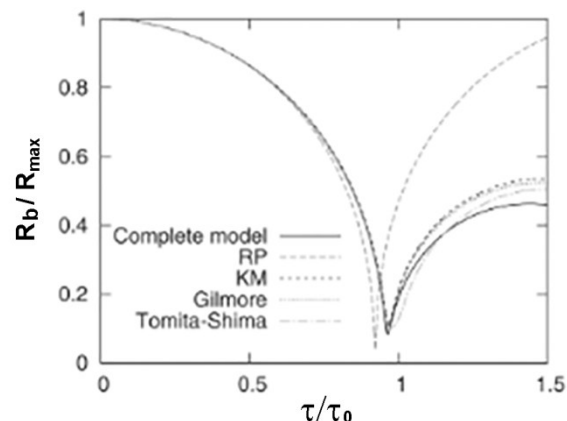


Рис. 2.4. Еволюція радіуса бульбашки як функції часу для рівняння RP [253], рівнянь KM [259], Gilmore [413] та Tomita і Shima [415] з поправками на стисливість. За даними [410].

Рис. 2.3 демонструє, як в ідеалізованій задачі число Маха $Ma = c_{ac}^{-1} \cdot dR/d\tau$ на поверхні бульбашки зростає зі зменшенням безрозмірного початкового радіуса бульбашки R_0/R_{max} , де R_{max} – радіус максимально розширеної бульбашки на початку її стискання. Лінія, позначена як «нестислива», відповідає розрахунку за рівнянням Релея–Плесета. Розрахунки виконано при початковій різниці тисків $p_\infty - p_g = 51,7$ кПа.

На рис. 2.4 представлена залежність безрозмірного радіуса бульбашки як функції безрозмірного часу для стандартного рівняння Релея–Плесета (RP) нульового порядку та рівнянь типу RP першого порядку з поправками на стисливість: рівняння Келлера–Міксіса (KM), рівняння Гілмора, а також рівняння Томіта і Шима другого порядку. На цих графіках співвідношення між тиском рідини на нескінченності p_∞ та початковим тиском максимально розширеної бульбашки $p_\infty/p_{b0} = 100$. Наведена на рисунку жирна крива (complete model) відповідає розрахункам за повною моделлю авторів [415], яка розв’язує рівняння маси, імпульсу та енергії як всередині бульбашки, так і в навколишній рідині. Модель, призначена для аналізу динаміки бульбашок в акустичному полі, безпосередньо

враховує ефекти стисливості рідини, що дозволяє вивчати фізичні явища, де невеликі зміни густини рідини можуть відігравати важливу роль.

З обох рисунків видно, що представлене сімейство рівнянь, яке є модифікацією рівняння Релея–Плесета для урахування стисливості рідини мало відрізняються одне від одного. На думку авторів робіт [408, 411, 413] слід шукати нових плідних стратегій моделювання динаміки кавітаційних бульбашок в стисливій рідині.

2.3.2. Модель динаміки бульбашок в стисливій рідині на основі механізму гідравлічного удару

Як зазначено вище, теоретичні дослідження кавітації спрямовані на розробку моделей динаміки бульбашок в яких використовуються різні модифікації рівняння Релея–Плесета, що враховують ефекти стисливості. Існує набір наближених рівнянь, що мають однаковий ступінь точності і повністю еквівалентні за формальними ознаками, але не мають чіткого зв'язку один з одним. Такого типу рівняння використовуються для дослідження динаміки одиночних бульбашок у процесах акустичної та гідродинамічної кавітації. Однак, подібні дослідження зосереджені переважно на поведінці внутрішньої частини бульбашки, тоді як аналіз динаміки навколишньої рідини при захопленні бульбашки дуже недосконалий.

В плані подальшої модифікації математичної моделі ДОБ вперше проведено моделювання динаміки парогазових бульбашок у стисливій рідині з урахуванням ефектів сферичного гідравлічного удару.

Постановка задачі. Розглядається сферична бульбашка з початковим радіусом R_0 , яка перебуває в нескінченному об'ємі в'язкої стисливої рідини з температурою T_{l0} , тиском p_{l0} і густиною ρ_l . Усередині бульбашки міститься насичена пара з тиском $p_v = p_{sat}(T_{l0})$ і неконденсований газ з тиском p_{g0} , так що сумарний тиск пари і газу всередині бульбашки $p_{b0} = p_v + p_{g0}$. Умова рівноваги бульбашки з рідиною визначається співвідношенням (1.6) Розділу 1.

$$p_{b0} \equiv p_{g0} + p_v = p_{l0} - 2\sigma(T_{l0})/R_0, \quad (2.26)$$

де $\sigma(T_l)$ – поверхневий натяг рідини. На основі припущень про ідеальність газу та про сталість маси газу в бульбашці ($m_g = \text{const}$) зміна тиску газу всередині бульбашки в процесі її стиснення або зростання визначається за формулою

$$p_g(\tau) = p_{g0}(R_0^3/R(\tau)^3). \quad (2.27)$$

Починаючи з часу $\tau = 0$ тиск у рідині $p_{l\infty}$ протягом короткого проміжку часу $\delta\tau_1$ спадає до значення $p_b - p_l$, завдяки чому бульбашка активується і потім під різницею тисків $p_b - p_l$ розширюється до того моменту, поки зростаючий тиск в рідині $p_l(\xi)$ не перевищить значення $p_l = p_{sat}(T_{l0})$. В цей момент зростаюча бульбашка досягає свого максимального розміру R_{max} , після чого, при подальшому зростанні тиску в рідині, починає швидко стискатися під дією різниці тисків $p_l - p_b$ і різко зростаючого капілярного тиску $2\sigma(T_l)/R$. Рідина на околиці бульбашки рухається прискорено в радіальному напрямі до центру бульбашки. У процесі стиснення тиск усередині бульбашки $p_b \cong p_g$ збільшується через швидке зростання тиску газу $p_g \propto R^{-3}$. Коли зростаючий тиск газу в бульбашці p_b перевищить тиск рідини на стінку бульбашки $p_R(\tau) = p_{l\infty}(\tau_0) + 2\sigma/R(\tau_0)$, швидкість радіального руху рідини на межі з бульбашкою досягне максимального значення $v_{R\max} = dR/d\tau$.

Відповідно, кінетична енергія рідини E_{kinl} також стає максимальною, а механічна потенціальна енергія системи приймається рівною нулю ($E_{pot} = 0$). Після цього рідина рухається з уповільненням аж до повної зупинки, а бульбашка стискається до мінімального розміру R_{min} . При різкій зупинці рідини на поверхні гранично стисненої бульбашки виникає ефект гідравлічного удару, внаслідок чого кінетична енергія рідини повністю переходить у потенціальну енергію системи «рідина-бульбашка», а тиск у рідині на межі з бульбашкою зростає до максимального значення $p_{R\max}$.

Проаналізуємо зміну кінетичної та потенціальної енергії системи в процесі стиснення та подальшого розширення бульбашки починаючи з моменту початку

гальмування, коли потенційна енергія $E_{pot} = 0$. До цього моменту рідину можна розглядати як нестисливу.

При вирішенні задачі використовується сферична система координат з початком у центрі бульбашки, яка протягом усього процесу вважається сферичною.

Кінетична енергія. Розділимо обсяг рідини поблизу бульбашки на елементарні концентричні сферичні зони шириною dr . Об'єм кільцевої зони на відстані r від центру бульбашки $\delta V(r) = 4\pi r^2 dr$, а маса рідини в зоні $\delta m(r) = \text{const}$. Швидкість рідини на межі з бульбашкою $v_R = dR/d\tau$, а швидкість радіального руху шару рідини на відстані r дорівнює $v(r, \tau) = v_R(\tau)R^2/r^2$. Кінетична енергія рідини всередині цієї елементарної зони

$$\delta E_{kin l} = \frac{\delta m \cdot v^2}{2} = \frac{(\rho_l \cdot 4\pi r^2 dr) \cdot v^2}{2} = (2\pi R^4 \rho_l v_R^2) \cdot \frac{dr}{r^2}. \quad (2.28)$$

Інтегруючи праву частину (2.28) по всьому об'єму рідини знаходимо кінетичну енергію радіального руху рідини, що оточує бульбашку

$$\delta E_{kin l} = (2\pi R^4 \rho_l v_R^2) \int_R^\infty \frac{dr}{r^2} = 2\pi R^3 \rho_l v_R^2 = 3 \cdot \left(\frac{4}{3} \pi R^3 \rho_l \frac{v_R^2}{2} \right) = m_{eff} \frac{v_R^2}{2}. \quad (2.29)$$

Кінетична енергія нескінченного об'єму рідини виявляється кінцевою величиною, що дорівнює $m_{eff} \cdot v_R^2/2$, а маса цього об'єму рідини еквівалентна масі рідини $m_{eff} = 3 \times 4/3 \pi R^3 \rho_l = 4\pi R^3 \rho_l$, що займає потрібний об'єм бульбашки.

У стисливій рідині зміна кінетичної енергії в першому шарі, що прилягає до бульбашки, передається в кульовий шар на відстані r за час $\Delta\tau_r = (r - R_{min})/c_{ac}$, де c_{ac} – швидкість звуку в нерухомій рідині. При різкій зупинці першого шару рідини, що лежить на поверхні гранично стиснутої бульбашки, тобто при реалізації сферичного гідравлічного удару, кінетична енергія всього об'єму рідини перетворюється на потенціальну енергію не миттєво, як в нестисливій рідині, а за скінченний час. Цей час можна оцінити, якщо визначити мінімальну відстань від центра бульбашки r_{min} , за межами якої швидкість рідини відносно центра бульбашки нехтовно мала порівняно зі швидкістю біля її поверхні.

З умови нерозривності випливає, що швидкість рідини на відстані r від центра бульбашки дорівнює $v(r) = v_R(\tau)R^2/r^2$. Приймаючи як приклад, що радіус гранично стисненої бульбашки $R_{min} \propto 1$ мкм, а максимальна швидкість рідини біля її поверхні $v_R \leq 10^3$ м/с, що узгоджується з відомими експериментальними даними, визначимо відстань r_{min} за межами якої $v(r) \leq 10^{-3}$ м/с, тобто $v(r_{min})/v_R \leq 10^{-6}$. Для заданих умов $r_{min} \approx 1$ мм.

Отже, при реалізації сферичного гідравлічного удару трансформація кінетичної енергії в потенційну в першому шарі на поверхні бульбашки передається на відстань r_{min} за час $\Delta\tau = r_{min}/c_{ac} \propto 1$ мкс.

Потенціальна енергія рідини. Розглянемо, як змінюється потенціальна енергія в елементарному шарі на околиці бульбашки при гальмуванні рідини. Зменшення кінетичної енергії у шарі δE_{kin} супроводжується підвищенням потенціальної енергії δE_{pot} , пов'язаним з роботою зі стиснення шару. При стисненні шару його об'єм зменшується ($\delta V < \delta V_0$). Величина надлишкового тиску, що виникає в цьому шарі, визначається зі співвідношення

$$\Delta p = -\frac{\delta V - \delta V_0}{\delta V_0 \cdot \beta_{ad}}, \quad (2.30)$$

де β_{ad} – коефіцієнт адіабатичної стисливості рідини. З урахуванням (2.30) зміна потенціальної енергії рідини, пов'язана з роботою зі стиснення шару, визначається як

$$dE_{pot\ l} = \int_0^{\delta V - \delta V_0} \Delta p(V) \cdot dV = \frac{(\delta V - \delta V_0)^2}{2\delta V_0 \cdot \beta_{ad}} = \frac{(\Delta p)^2 \beta_{ad} \delta V_0}{2}. \quad (2.31)$$

Зміна потенціальної енергії в шарі в процесі стиснення дорівнює зміні кінетичної енергії в цьому шарі, яка, відповідно до рівняння (2.28), визначається як

$$dE_{kin\ l} = \frac{dm(\Delta v_r)^2}{2} = \frac{\rho_l \cdot \delta V_0 (\Delta v_r)^2}{2}. \quad (2.32)$$

Порівнюючи праві частини (2.31) і (2.32), знайдемо залежність, що пов'язує зміну тиску в цьому шарі зі зміною швидкості

$$(\Delta p)^2 \beta_{ad} = \rho (\Delta v_r)^2. \quad (2.33)$$

Коефіцієнт адіабатичної стисливості пов'язаний зі швидкістю звуку співвідношенням $\beta_{ad} = \rho c_{ac}^2$. Підставляючи це значення (2.33), приходимо до відомого рівняння Жуковського, що визначає величину надлишкового тиску в рідині при реалізації явища гідравлічного удару

$$\Delta p = \sqrt{(\rho/\beta_{ad})} \cdot \Delta v_r = \rho c_{ac} \Delta v_r. \quad (2.34)$$

Зміна тиску в шарі на відстані r визначається величиною надлишкового тиску $\Delta p_r = p_r(r) - p_{l\infty}$. У шарі рідини, що прилягає до поверхні бульбашки, величина надлишкового тиску $\Delta p_R = p_R - p_{l\infty}$. Розкриваючи члени у правій частині (2.31), потенціальну енергію рідини у шарі на відстані представимо в наступному вигляді

$$dE_{pot\ l}(r) = \frac{(\Delta p)^2 \beta_{ad} \delta V_0}{2} = \frac{4\pi(p_r - p_{l\infty})^2 \beta_{ad} \cdot r^2 dr}{2}. \quad (2.35)$$

Використовуючи рівняння Жуковського для першого шару та для шару на відстані r , запишемо

$$(p_R - p_{l\infty}) = \rho c_{ac} v_R \quad \text{і} \quad (p_r - p_{l\infty}) = \rho c_{ac} v_r. \quad (2.36)$$

Звідси

$$p_r - p_{l\infty} = (p_R - p_{l\infty}) \frac{v_r}{v_R} = (p_R - p_{l\infty}) \frac{R^2}{r^2}. \quad (2.37)$$

Підставляючи в (2.35) вираз з рівняння (2.37), отримаємо

$$dE_{pot\ l}(r) = \frac{2\pi(p_R - p_{l\infty})^2 \beta_{ad} \cdot R^4 dr}{r^2}. \quad (2.38)$$

Інтегруючи (2.38) у межах від $r = R(\tau)$ до $r \rightarrow \infty$ і, виконавши очевидні перетворення, знайдемо поточне значення величини потенціальної енергії всього об'єму рідини в процесі стиснення бульбашки.

$$dE_{pot\ l}(\tau) = \frac{4}{3} \pi R^3 \frac{(p_R - p_{l\infty})^2 \beta_{ad}}{2} \cdot 3 = m_{eff} \frac{(p_R - p_{l\infty})^2 \beta_{ad}}{2} \frac{1}{\rho_l}. \quad (2.39)$$

де ефективна маса рідини $m_{eff} = 4\pi R^3 \rho_l$ має той самий фізичний зміст, що й у рівнянні (2.29).

Рівняння динаміки бульбашки для стисливої рідини. Зміна кінетичної енергії рідини дорівнює сумі доданків, що визначають зміну потенціальної енергії газу в бульбашці та рідині

$$\frac{dE_{kin}}{d\tau} = -\frac{dE_{pot l}}{d\tau} - \frac{dE_{pot b}}{d\tau}. \quad (2.40)$$

Значення $dE_{kin}/d\tau$ і $dE_{pot l}/d\tau$ знаходимо, використовуючи відповідно рівняння (2.29) і (2.39). Зміна кінетичної енергії рідини за одиницю часу описується рівнянням

$$\frac{dE_{kin l}}{d\tau} = \frac{d(2\pi R^3 \rho_l v_R^2)}{d\tau} = 4\pi R^2 \rho_l \left(\frac{3}{2} v_R^2 + R \frac{dv_R}{d\tau} \right) \cdot \frac{dR}{d\tau}. \quad (2.41)$$

Зміна потенціальної енергії рідини за одиницю часу описується рівнянням

$$\frac{dE_{pot l}}{d\tau} = \frac{d}{d\tau} (2\pi (p_R - p_{l\infty})^2 \beta_{ad} R^3) = 6\pi R^2 (p_R - p_{l\infty})^2 \cdot \beta_{ad} \cdot \frac{dR}{d\tau}. \quad (2.42)$$

Зміна потенціальної енергії стиснення газу в кавітаційній бульбашці за одиницю часу описується рівнянням, представленим в роботі [7]

$$\frac{dE_{pot b}}{d\tau} = 4\pi R^2 (p_R - p_{l\infty}) \cdot \left(\frac{dR}{d\tau} \right). \quad (2.43)$$

У цьому рівнянні використовуються величини густини та тиску газу усереднені за об'ємом бульбашки. Підставляючи в рівняння (2.40) праві частини рівнянь (2.41), (2.42) і (2.43) після проведення очевидних перетворень приходимо до рівняння, яке описує динаміку одиничної сферичної бульбашки в стисливій рідині

$$\frac{dv_R}{d\tau} = \frac{p_R - p_{l\infty} + 3/2 (p_R - p_{l\infty})^2 \beta_{ad} - 3/2 \rho v_R^2}{\rho R}. \quad (2.44)$$

При $\beta_{ad} = 0$ рівняння (2.44) зводиться до класичного рівняння Релея–Плесета, що описує динаміку бульбашки в нестисливій рідині.

$$\frac{dv_R}{d\tau} = \frac{p_R - p_{l\infty} - 3/2 \rho v_R^2}{\rho R}. \quad (2.45)$$

У рівняннях (2.42) – (2.45) p_R – тиск у рідині на межі з бульбашкою, що пов'язаний з тиском газової суміші у бульбашці співвідношенням [1, 13, 258, 260].

$$p_R = p_b - \frac{2\sigma}{R} - \frac{4\mu_l \cdot v_R}{R}, \quad (2.46)$$

де $\mu_l = f(T_l)$ – динамічна в'язкість рідини на межі з бульбашкою.

Таким чином, рівняння (2.44) – це виведене нами модифіковане рівняння Релея–Плесета, що враховує стисливість рідини.

При дослідженні ефектів кавітації в нестисливій рідині як рівняння руху застосовувалося рівняння Релея–Плесета у формі рівняння (2.45), яке при урахуванні стисливості рідини замінюється рівнянням (2.44). При розрахунку динаміки бульбашки в стисливій рідині рівняння (2.44) використовується в моделі ДОБ і в моделі ДБА замість рівняння Релея–Плесета разом з іншими рівняннями системи, наведеними в підрозділі 2.2. Система рівнянь обов'язково містить незалежне рівняння зміни у часі зовнішнього тиску.

Аналіз результатів. За допомогою математичної моделі ДОБ проведено обчислювальний експеримент по осциляції парогазової бульбашки в стисливій рідині в процесі гідродинамічної кавітації за час її проходження через сопло Вентурі. При проходженні швидкісного потоку рідини через звужувально-розширювальні ділянки сопла Вентурі виконуються умови кавітації – різке спадання тиску до мінімального значення $p_{l\min} < p_{sat}(T_{l0})$ з наступним його зростанням до $p_{l\min} \gg p_{sat}(T_{l0})$, що забезпечує формування і зростання бульбашок з наступним їх захопленням в конфузорній ділянці сопла. Задаючи потрібну геометрію сопла Вентурі, а також значення тиску на вході p_{l0} і на виході з сопла p_k , і визначаючи тиск p_{thr} в горловині сопла, можна розрахувати за допомогою рівняння Бернуллі зміну тиску у фіксованому об'ємі рідини при її перебігу через сопло. Знайдена таким чином аналітична залежність $p_{l\infty} = f(\tau)$ використовується в моделі ДОБ для розрахунку динаміки кавітаційної бульбашки в стисливій рідині.

Цей обчислювальний експеримент проводився для води з температурою $T_{l0} = 293$ К при постійних заданих значеннях тиску $p_{l0} = 4,0$ атм, $p_a = 1$ атм та $p_{thr} = -0,5$ атм. Розглядалася еволюція одиничних парогазових зародків з початковими радіусами R_0 від 1 мкм до 10 мкм.

На рис. 2.5 представлено розраховані за моделлю ДОБ порівняльні характеристики осциляції бульбашок у нестисливій та стисливій воді для

активованої мікробульбашки з початковим радіусом $R_0 = 7,5$ мкм. Розрахунок проводився з використанням рівняння Релея–Плесета у формі (2.45) для нестисливої рідини та рівнянням (2.44) для стисливої рідини. Зміну зовнішнього тиску, що обумовлює активацію зростання і подальше стиснення бульбашок показано на рисунках 2.5 а та 2.5 б пунктирними лініями.

Результати, представлені на рис. 2.5, підтверджують встановлену раніше закономірність, що в типових кавітуючих потоках максимальний розмір бульбашки приблизно в 100 разів перевищує початковий розмір газового зародка [413]. На рисунках також видно, що в нестисливій рідині тривалість осциляції бульбашок до остаточного захлопування майже в п'ять разів більша, ніж в стисливій рідині.

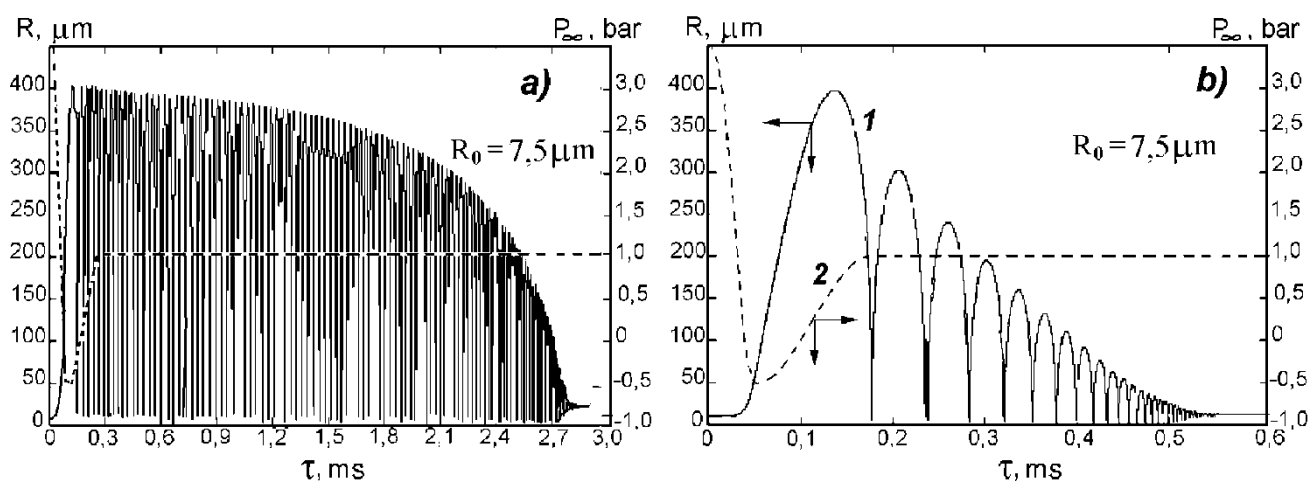


Рис. 2.5. Зміна з часом радіуса парогазової бульбашки в процесі її осциляції у воді з урахуванням нестисливості (а) та стисливості рідини (б). Пунктирною лінією показано зміну зовнішнього тиску рідини. Розрахунок за моделлю ДОБ за умов $R_0 = 7,5$ мкм; $p_0 = 4,0$ атм; $p_a = 1$ атм; $T_{l0} = 293$ К.

У нестисливій рідині (рис. 2.5 а) тривала осциляція бульбашок з повільним зниженням амплітуди обумовлена незначною втратою енергії за рахунок в'язкості рідини, термічних ефектів та кінетики фазових переходів.

У стисливій рідині в кожному циклі коливань втрати енергії пов'язані, насамперед, перетворенням потенціальної енергії стиснутої рідини в характерний для гідравлічного удару потужний акустичний імпульс, який безповоротно

розсіюється в навколишній рідині. Як наслідок, через суттєву втрату енергії гранично стиснена бульбашка не може відновитися до попереднього розміру.

Отже, механізм згасання осциляції бульбашок в стисливій рідині можна пояснити в рамках уявлення про сферичний гідравлічний удар без введення будь-яких підгоночних поправок, якщо модель включає фізичні фактори, відповідальні за поведінку бульбашок на стадії їх колапсу.

В кожному циклі коливань протягом часу стиснення та подальшого розтягування рідини на межі з бульбашкою її радіус R_{min} зберігає постійне значення, а фізичні параметри газової суміші у бульбашці (T_b, p_b) , досягаючи максимального значення, також залишаються незмінними. Тривалість сферичного гідравлічного удару, тобто час перебування стисненої бульбашки у стані спокою залежить від значення її мінімального радіуса R_{min} в даному циклі коливань.

У цьому дослідженні розраховані максимальні значення тиску газу всередині бульбашки на стадії його захлопування ($p_b \leq 400$ МПа) та максимальні значення температури. Згідно з відомими експериментальними та розрахунковими даними [18, 58, 59, 79, 117] тиск усередині екстремально стисненої бульбашки досягає 10^3 МПа, а температура може перевищувати 10^4 К, що набагато вище критичних значень цих параметрів, які для води становлять, відповідно, 22,5 МПа і 647 К.

У такій ситуації поняття міжфазної поверхні втрачає фізичне значення. Протягом короткого часу порядку 1 мкс речовина всередині локального сферичного «терміка» перебуває в стані надкритичного флюїду (НКФ) [63–65]. При цьому, в малій локальній сферичній зоні виникає аномально високий градієнт температури 10^8 К/м [13, 18] кавітаційної бульбашки та її дроблення на безліч дрібних мікробульбашок. Зазначені ефекти проаналізовані в [417] без урахування стисливості рідини і певною мірою використовуються в рівняннях моделі ДОБ. Це дозволяє більш коректно описувати поведінку гранично стисненої бульбашки оскільки жодна з відомих моделей динаміки бульбашки не враховує можливість переходу речовини в системі «бульбашка-рідина» в надкритичний стан.

Дане аналітичне дослідження проведено в рамках загальноприйнятих припущень про існування межі поділу рідини та газу на всіх етапах еволюції сферичної кавітаційного бульбашки, включаючи стадії максимального стиснення та розширення (відскоку) бульбашки. Очевидно, у плані подальших досліджень доцільно розглянути розвиток гідравлічного удару на поверхні колапсуючої бульбашки за умови короткочасного зникнення міжфазної межі і переходу речовини в стан надкритичного флюїду.

2.4. Моделювання кінетики кавітаційного закипання рідини

2.4.1. Термодинамічний аналіз процесів ізотермічного та ізобаричного закипання рідини

З точки зору термодинаміки кавітаційне кипіння і термічне кипіння рідини розглядаються як тотожні явища, зумовлені релаксацією виведеної з рівноваги системи рідина-пара до стану термодинамічної рівноваги, які відрізняються лише шляхом переходу системи до стабільного стану. Критерієм рівноваги системи є одночасна рівність в обох фазах тисків ($p_v = p_l$), температур ($T_v = T_l$) та хімічних потенціалів ($\mu_v = \mu_l$) [1, 10, 13, 418–420].

Особливості фазового переходу рідина-пара у процесах кипіння схематично зображені на рис. 2.6 *а, б*, де представлені $p - T$ (рис. 2.6 *а*) та $p - V$ (рис. 2.6 *б*) діаграми стану для води. На цих рисунках лінія бінодалі (Bi), яка розділяє області однофазних станів рідини та пари, утворена сукупністю значень температури $T_v = T_l = T_{boil}(p_l)$ і тиску $p_v = p_l = p_{sat}(T_l)$, які відповідають зазначеним вище критеріям. Існують дві очевидні можливості фазового переходу рідини у пару.

Нехай вода знаходиться в стані рівноваги при атмосферному тиску $p_{l0} = 100$ кПа та температурі $T_{l0} = 20$ °C (точка А на рис. 2.6 *а, б*). Фазовий перехід можна здійснити шляхом ізобаричного нагрівання води до температури кипіння $T_l = T_{boil}(p_{l0})$ переходом через лінію бінодалі (точка В на рис. 2.6 *а, б*). У цьому випадку релаксація термічно нерівноважної рідини системи в стабільний стан пари контролюється різницею температур ($T_l - T_v$) та хімічних потенціалів ($\mu_l - \mu_v$).

Перевести воду в пару можна також при ізотермічному зниженні тиску рідини p_l до значення тиску насиченої пари ($p_l = p_{sat}(T_{l0})$) з переходом через лінію бінодалі (точка С на рис. 2.6 а, б). У цьому випадку потенціалом процесу релаксації механічно нерівноважної рідинної системи в стан пари є різниця тисків ($p_v - p_l$).

В обох випадках при перетині лінії бінодалі в процесі фазового переходу рідина-пара спостерігається інтенсивне пароутворення [15, 419].

Однак між цими двома процесами фазового переходу існують певні принципові відмінності. Час релаксації механічно нерівноважної системи з потенціалом ($p_v - p_l$) в кавітаційних процесах набагато коротший від часу релаксації термічно нерівноважної системи, пов'язаної з різницею температур $T_l - T_v$) та хімічних потенціалів $\mu_l - \mu_v$, котрі лімітують процеси термічного кипіння. Іншими словами, можна дуже швидко змінити тиск одразу у всьому об'ємі рідини, але неможливо швидко та рівномірно змінити її температуру.

Еволюція бульбашки у процесах кавітації лімітується не теплообміном або кінетикою фазових переходів, а насамперед швидкими інерційними ефектами в навколишній рідині. Саме тому кавітація на початковій і на завершальній стадії свого розвитку проявляється як вибуховий процес, руйнівний і сильніший, ніж динаміка бульбашок у повільних процесах термічного кипіння чи конденсації.

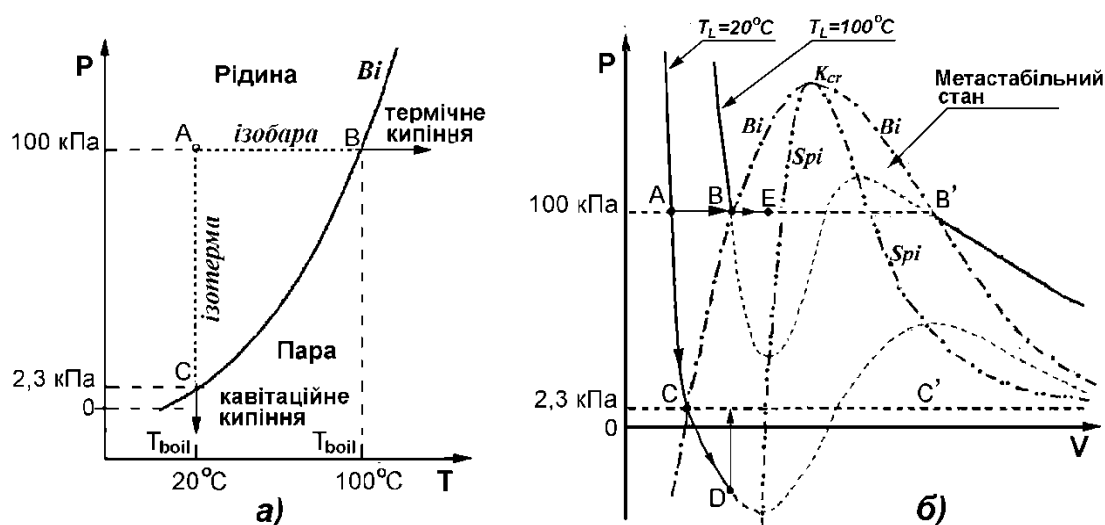


Рис. 2.6. Інтерпретація кінетики закипання води на $p - T$ (а) та на $p - V$ (б) діаграмах стану.

На $p - V$ діаграмі стану (рис. 2.6 б) процес закипання описується деякою траєкторією або точкою всередині області метастабільного стану, обмеженою з одного боку лінією бінодалі (Bi), а з іншого – лінією спінодалі (Sp_i), котра визначає межу термодинамічної стійкості. При ізотермічному скиданні тиску у воді, що знаходиться в точці А ($p_{l0} = 100$ кПа, $T_{l0} = 20$ °С) і переході по ізотермі А – С через бінодаль (точка С) рідина потрапляє в метастабільну область ($p_l < p_{sat}(T_{l0})$). Ступінь проникнення в метастабільну область визначається точкою D (рис. 2.6 б).

Далі можливі наступні варіанти розвитку системи.

Якщо концентрація зародків порівняно крупного розміру достатньо велика починається процес пароутворення. Тиск у рідині швидко зростає до значення $p_l = p_{sat}(T_{l0})$ і закипаюча рідина зі стану D відразу переходить на лінію реальної ізотерми С – С'. За цією траєкторією при постійних значеннях температури T_{l0} і тиску $p_{sat}(T_{l0})$ йде монотонний процес кипіння до остаточного переходу рідини у стан пари. При низьких концентраціях та малих розмірах мікрозародків точка D зміщується вглиб метастабільної області, ближче до лінії спінодалі.

Рідина в точці D знаходиться в стані розтягування, а різниця тисків між точками С і D визначає ступінь розтягування рідини. При цьому, як видно з рис. 2.6 б, тиск може знизитись до негативних значень ($p_l < 0$). Потім відбувається вибухове закипання розтягнутої рідини і система переходить на траєкторію монотонного кипіння С – С'. В обох варіантах кипіння здійснюється виключно за рахунок гетерогенного зародкоутворення через присутність у рідині газових мікробульбашок. Граничне розтягування ідеальної рідини, що відповідає мінімуму на ізотермі Ван-дер-Ваальса, можливе лише для особливо очищеної рідини, яка не містить розчинених або вільних газів. За сучасними уявленнями розрив рідини під дією розтягувальних напружень відбувається на газових зародках. Значення міцності на розрив, отримані в експериментах для звичайної відстояної води, не перевищують 0,1 МПа [129] хоча для спеціально очищеної води були досягнуті значення 25 МПа [1, 13, 26, 421].

Розглянутий вище механізм закипання спостерігаються і при ізобаричному підвищенні температури рідини [421, 422]. При нагріванні води, яка знаходиться в точці А, вона переходить по ізобарі А – В' через лінію бінодалі в точці В і входить у метастабільну область ($T_l < T_{boil}(p_{l0})$). Ступінь проникнення в метастабільну область визначається точкою Е (рис. 2.1 б), яка для ізобаричного процесу є аналогом точки D. Різниця температур між точками Е і В визначає ступінь перегріву рідини до початку інтенсивного пароутворення.

Початок і розвиток процесів як кавітаційного, так і термічного кипіння залежить від концентрації та від розміру газових мікрозародків.

Вода (як і інші рідини) містить велику кількість стабільних бульбашок в інтервалі $R_0 = 0,1 \div 10$ мкм, які є потенційними центрами кипіння. У відстояній воді чітко виражений максимум густини розподілу бульбашок спостерігався при $R_0 \approx 2,5$ мкм [1]. В інтервалі розмірів $R_0 = 1,2 \div 12$ мкм у дистильованій воді понад 90% об'єму займають бульбашки з радіусами $R_0 = 1,4 \div 2,2$ мкм, а у відстояній воді – з $R_0 = 4 \div 8,5$ мкм [125]. Доведено також, що в 1 м^3 води при $20\text{ }^\circ\text{C}$ міститься близько $2 \cdot 10^{15}$ бульбашок з середнім радіусом 20 нм [423, 424].

Причини тривалої (практично необмеженої в часі) присутності у воді стабільних мікробульбашок з радіусами $R_0 < 1$ мкм не знайшли однозначного пояснення і ця тема досі залишається предметом широких дискусій.

Підсумовуючи сказане, можна стверджувати, що 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.

2.4.2. Умови порушення рівноваги в системі «парогазові бульбашки – рідина» в процесі кавітаційного закипання в ізотермічному режимі

Проаналізуємо спочатку умови, за яких парогазова бульбашка може стабільно існувати в рівновазі з рідиною без зміни свого розміру.

Нехай парогазова бульбашка з радіусом R_0 знаходиться у воді з температурою $T_{l0} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, під тиском $p_{l0} = 0,1\text{ МПа}$. Усередині бульбашки міститься неконденсований газ (азот, кисень, повітря тощо) з парціальним тиском p_{g0} і водяна пара з тиском $p_v = p_{sat}(T_{l0}) = \text{const}$. Газ в бульбашці приймається ідеальним. Маса газу в бульбашці з радіусом R_0 розраховується з рівняння $m_g = \rho_g \cdot 4/3 \cdot \pi R_0^3$, де густина газу $\rho_g = f(p_{g0}, T_0)$ вважається відомою величиною. Прийнято обґрунтоване припущення, що в процесі швидкого скидання тиску в рідині маса газу всередині бульбашки залишається незмінною.

З боку газової фази на внутрішню її поверхню діє тиск газу p_{g0} і тиск пари $p_v = p_{sat}(T_{l0})$. З боку рідини на зовнішню поверхню бульбашки діє тиск рідини p_{l0} і капілярний тиск $p_{\sigma} = 2\sigma/R_0$, зумовлений наявністю коефіцієнта поверхневого натягу σ і кривизною міжфазної поверхні. Величина капілярного тиску тим більша, чим менший радіус бульбашки. Розрахунок показує, що капілярний тиск p_{σ} , який діє на парогазову бульбашку з радіусом $R_0 = 1\text{ мкм}$ у воді за нормальних умов ($p_{\sigma} = 0,145\text{ МПа}$) в 1,5 рази перевищує величину атмосферного тиску $p_{l0} = 0,1\text{ МПа}$. На рис. 2.7 схематично зображено тиски, які діють на поверхню парогазової бульбашки, що знаходиться в рідині.

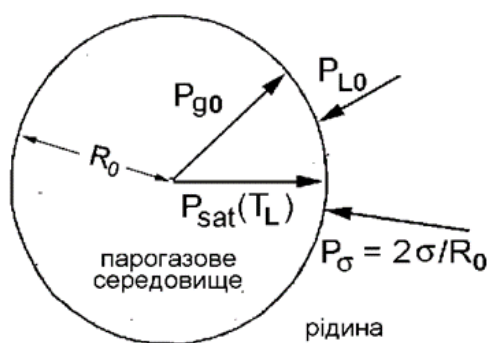


Рис. 2.7. Тиски, які діють на поверхню парогазової бульбашки з боку газової фази усередині бульбашки і з боку оточуючої рідини.

Умова рівноваги бульбашки описується рівністю

$$p_{g0} + p_{sat}(T_{l0}) = p_{l0} + 2\sigma/R_0, \quad (2.47)$$

При зміні тиску в рідині p_{l0} подальший процес еволюції бульбашки перебігає в ізотермічному режимі. Тому, при допущенні ідеальності газу, парціальний тиск газу в бульбашці зі зміною її об'єму змінюється по закону Бойля–Маріота

$$p_g = p_{g0} \left(\frac{R_0}{R_b} \right)^3. \quad (2.48)$$

При цьому тиск пари залишається незмінним ($p_v = p_{sat}(T_0) = const$).

Початковий тиск газу в бульбашці p_{g0} визначаємо з рівності (2.47)

$$p_{g0} = p_{l0} - p_{sat}(T_{l0}) + 2\sigma/R_0. \quad (2.49)$$

З (2.47) випливає, що при будь-якому підвищенні тиску в рідині бульбашка завжди переходить у новий рівноважний стан, але з меншим розміром.

При зниженні тиску p_l можливі два варіанти еволюції бульбашки.

При зменшенні p_l до деякого значення $p_{l1} < p_{l0}$ умова рівноваги в (2.47) порушується. Бульбашка розширюється і стабілізується в новому рівноважному стані з $R_1 > R_0$ умову рівноваги в якому запишемо у вигляді

$$p_{g0}(R_0/R)^3 + p_{sat}(T_{l0}) = p_{l1} + 2\sigma/R_1. \quad (2.50)$$

В процесі розширенні бульбашки тиск газу $p_g \propto R_b^{-3}$ знижується набагато швидше, ніж протидіючий йому капілярний тиск $p_\sigma \propto R_b^{-1}$, так що при подальшому зростанні бульбашки тиском газу p_g можна практично знехтувати. При зменшенні p_l в рідині у правій частині рівняння (2.50) одночасно зменшуються складові тиску з боку рідини p_{l1} і $p_{l1} + 2\sigma/R_1$, а в лівій частині рівняння сумарний тиск парогазової суміші всередині бульбашки поступово наближається до постійного значення тиску насиченої пари $p_{sat}(T_{l0})$. При подальшому скиданні тиску в рідині виникне ситуація, коли тиск на зовнішню поверхню бульбашки з боку рідини стає меншим за тиск насиченої пари всередині бульбашки $p_{sat}(T_{l0}) = const$. Цій критичній ситуації відповідає умова

$$p_{sat}(T_{l0}) \geq p_{lcr} + 2\sigma/R_{1cr}. \quad (2.51)$$

Нерівність (2.51) містить значення критичного тиску p_{lcr} та критичного поточного радіуса R_{cr} , при яких бульбашка почне безповоротно і необмежено

зростати – стає **активованою**. Величина $p_{l\ cr}$ 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 $p_{l\ cr}$ та відповідного йому значення критичного радіуса R_{cr} початково стабільної мікробульбашки з заданим радіусом R_0 застосуємо рівняння (2.50), представлене у вигляді

$$p_l(\tau) = \frac{p_{g0} \cdot R_0^3}{R^3(\tau)} - \frac{2\sigma}{R(\tau)} + p_{sat}(T_{l0}), \quad (2.52)$$

Параметричне рівняння (2.52), яке визначає залежність між поточним значенням тиску в рідині $p_{l\tau} = f(\tau)$ та відповідними поточними значеннями радіуса зростаючої бульбашки $R_\tau = f(\tau)$ в процесі ізотермічного скидання тиску у воді, дає можливість розрахувати критичні значення $p_\tau = p_{l\ cr}$ та $R_\tau = R_{cr}$, які відповідають початку незворотного зростання бульбашки, а також описати подальшу еволюцію бульбашки після її активації.

На рис. 2.8 представлено розраховані з рівняння (2.52) залежності $p_{l\tau} = f(R_\tau)$ для бульбашок з початковим радіусом R_0 , які до скидання тиску перебували у стані рівноваги у воді з температурою $T_{l0} = 20\ ^\circ\text{C}$ і атмосферним тиском $p_{l0} = 0,1\ \text{МПа}$.

Особливістю кривих рівноваги $p_l = f(R)$, представлених на рис. 2.8, є наявність мінімуму, який відповідає певним граничним значенням $p_{l\ cr}$ і R_{cr} для бульбашки з початковим радіусом R_0 . Якщо тиск в рідині зменшиться до значення $p_{li} \leq p_{l\ cr}(R_0)$, бульбашка, досягнувши критичного радіуса R_{cr} , почне необмежено зростати (*пунктирна лінія*) і врешті покине систему внаслідок швидкого спливання.

Пунктирна лінія, проведена через ці пікові екстремальні значення, є кривою втрати термодинамічної стійкості. Зліва від пунктирної лінії знаходиться стійка рівноважна область, тоді як праворуч від неї умови рівноваги порушуються. Отже, пунктирну лінію можна розглядати як аналог спінодалі на діаграмі Ван-дер-Ваальса (рис. 2.6 б), що визначає межу термодинамічної стійкості. Тоді ізобара, показана на рис. 2.8 горизонтальною штрих-пунктирною лінією, є лінією бінодалі. Між цими двома кривими лежить метастабільна область.

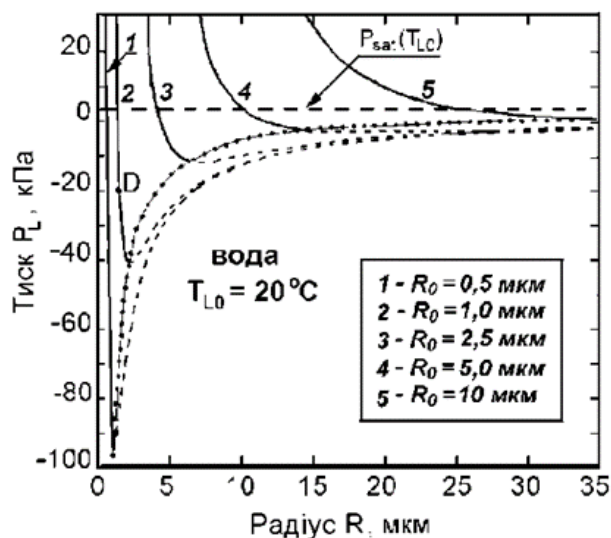


Рис. 2.8. Стійкі (суцільна лінія) та нестійкі (пунктир) стани бульбашок на кривих рівноваги $p_{l\tau} = f(R_\tau)$ для п'яти значень початкового радіуса бульбашок R_0 : 1 – 0,5 мкм; 2 – 1,0 мкм; 3 – 2,5 мкм; 4 – 5,0 мкм; 5 – 10 мкм.

Після досягнення критичного радіуса R_{cr} активована бульбашка швидко і необмежено зростає. При цьому тиск в оточуючій бульбашку розтягнутій рідині $p_l < p_{sat}(T_0)$, а тиск парогазової фази всередині зростаючої бульбашки дорівнює тиску насиченої пари $p_{sat}(T_0) = const$, у порівнянні з яким парціальний тиск газу дсередині бульбашки p_g є нехтовно малим.

З рис. 2.8 також впливає наступне. Якщо для заданого початкового радіуса R_0 визначено критичне значення тиску p_{lcr} то при досягненні такого тиску в даній системі не можуть стабільно існувати бульбашки з початковими радіусами $R \geq R_0$ (вони усі стають активованими), але всі бульбашки з початковими радіусами $R < R_0$ при цьому тиску будуть перебувати в стані рівноваги з рідиною як завгодно довго.

Як приклад розглянемо на рис. 2.8 криву рівноваги 2 для бульбашки з початковим радіусом $R_{20} = 1$ мкм. При зниженні тиску у воді від $p_0 = 100$ кПа до $p_l = -20$ кПа бульбашка розширюється ($R_2 > R_{20}$) і переходить в новий стійкий стан рівноваги, який позначено точкою D.

Коли тиск в рідині далі знизиться до значення $p_l = -40$ кПа, який для бульбашки 2 на кривій 2 є критичним, бульбашка з радіусом R_{2cr} переходить на

нестабільну частину кривої 2 (пунктир). Після цього вона необмежено зростає. Всі бульбашки з радіусами $R_i < R_{2\ cr}$ знаходяться у стійкій рівновазі, тоді як бульбашки з $R_i > R_{2\ cr}$ стають активованими і нестійкими. На рис. 2.8 видно, що при з тиску $p_{l\tau} = -40$ кПа, яке для бульбашок з $R_{2\ 0} = 1$ мкм (крива 2) є критичним, бульбашки з початковим розміром $R_0 = 0,5$ мкм (крива 1) перебувають у рівноважному стані далеко від лінії спінодалі. Великі бульбашки (криві 3, 4 і 5) починають необмежено зростати ще при порівняно малому зниженні тиску. При цьому для всіх бульбашок з $R_0 < 5$ мкм значення $p_{l\ cr} < 0$.

2.4.3. Розрахунок критичного тиску та критичного радіуса активованих бульбашок

Рівняння (2.52) дозволяє розрахувати критичний радіус R_{cr} та відповідний критичний тиск $p_{l\ cr}$ для бульбашки з початковим радіусом R_0 .

Для знаходження цих величин проведемо диференціювання рівняння (2.52) по R і визначимо екстремальне значення $R = R_{cr}$, при якому $dp_{l\tau}/dR_\tau = 0$.

$$\frac{dp_{l\tau}}{dR_\tau} = -\frac{3p_{g0} \cdot R_0^3}{R_{cr}^4} + \frac{2\sigma}{R_{cr}^2} \equiv 0. \quad (2.53)$$

Вирішуючи рівняння (2.53) відносно R_{cr} для заданого радіуса R_0 , знаходимо

$$R_{cr} = \sqrt{\frac{3p_{g0} \cdot R_0^3}{2\sigma}} = \sqrt{\frac{3p_{g0} \cdot R_0^2}{2\sigma/R_0}} = R_0 \sqrt{\frac{3p_{g0}}{p_{\sigma 0}}}. \quad (2.54)$$

Для розрахунку критичного тиску $p_{l\ cr}$ для бульбашки з тим же початковим радіусом R_0 знову застосуємо рівняння (2.52) для екстремальної точки, в якій $p_l = p_{l\ cr}$. В екстремальній точці рівняння (2.52) приймає вигляд

$$p_{lcr} = \frac{p_{g0} \cdot R_0^3}{R_{cr}^3} - \frac{2\sigma}{R_{cr}} + p_{sat}(T_{l0}). \quad (2.55)$$

Підставляючи в (2.55) значення критичного радіуса $R_{l\ cr}$ з рівняння (2.54) і вирішуючи це рівняння відносно змінної $p_{l\ cr}$ одержимо після простих перетворень формулу для розрахунку критичного тиску

$$p_{lcr} = p_{sat}(T_{l0}) - p_{\sigma 0} \sqrt{\frac{4p_{\sigma 0}}{27p_{g0}}}. \quad (2.56)$$

Формули (2.54) та (2.56) визначають, відповідно, значення критичного радіуса та критичного тиску активації будь-якої мікробульбашки з радіусом R_0 , яка первісно перебувала в рідині в рівноважному стані. Рівняння (2.29) та (2.31) містять параметр p_{g0} – тиск неконденсованого газу в рівноважній бульбашці, який визначається безпосередньо з рівняння (2.49).

На рис. 2.9 представлено розраховані за рівнянням (2.56) значення p_{lcr} , що визначають початок необмеженого зростання парогазових зародків у воді з температурою $T_{l0} = 20^\circ\text{C}$ в залежності від їх початкового рівноважного радіуса R_0 .

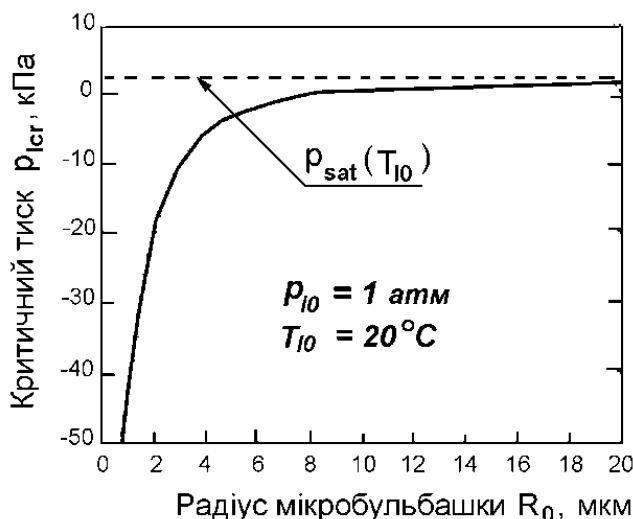


Рис. 2.9. Залежність критичного тиску p_{lcr} від радіуса парогазових бульбашок R_{0r} , які знаходяться у стані рівноваги у воді з температурою $T_{l0} = 20^\circ\text{C}$ під атмосферним тиском ($p_{l0} = 100$ кПа).

З рис. 2.9 видно, що для активації бульбашок з радіусами $R_0 < 9$ мкм тиск потрібно знизити до негативних значень ($p_{lcr} < 0$). З формули (2.56) легко розрахувати, що мікробульбашки з радіусом $R_0 = 0,1$ мкм активуються при від'ємному тиску $p_{lcr} = -0,55$ МПа, а нанобульбашки з радіусом $R_0 = 20$ нм – при від'ємному тиску $p_{lcr} = -3$ МПа.

Величина критичного тиску активації $p_{l\ cr}$ суттєво залежить від температури рідини T_{l0} оскільки рівняння (2.56) містить тиск насиченої пари $p_{sat}(T_{l0})$, який сильно зростає з температурою. З підвищенням T_{l0} активація бульбашок однакового розміру починається при більш високих значеннях тиску $p_{l\ cr}$. З підвищенням T_{l0} збільшується величина $p_{sat}(T_{l0})$ в лівій частині нерівності, а в її правій частині дещо зменшується величина капілярного тиску $2\sigma(T_0)/R_0$. Завдяки збільшенню вмісту пари в бульбашці зменшується відносна кількість стороннього газу і, відповідно, зменшується тиск газу p_{g0} та його маса.

На рис. 2.10 представлено залежності $p_{l\ cr} = f(R_0)$ розраховані за рівнянням (2.56) для трьох значень температури води T_{l0} (20 °C, 40 °C і 50 °C), яким відповідають значення тиску насиченої пари для води при цих температурах: $p_{sat}(20\ ^\circ\text{C}) = 2,3\ \text{кПа}$, $p_{sat}(40\ ^\circ\text{C}) = 7,4\ \text{кПа}$, $p_{sat}(50\ ^\circ\text{C}) = 12,3\ \text{кПа}$.

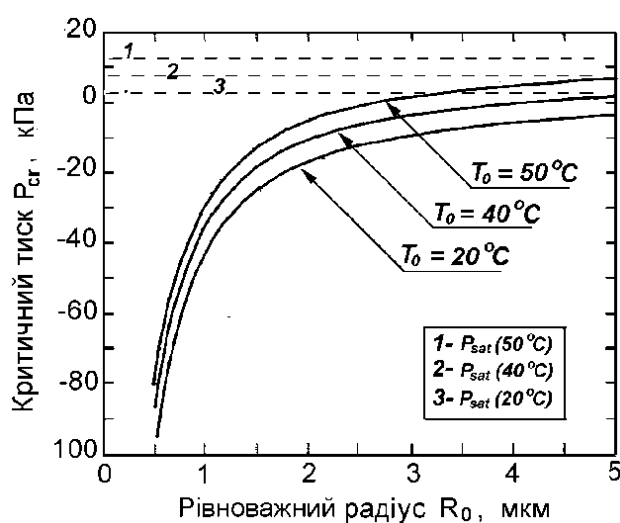


Рис. 2.10. Залежність критичного тиску $p_{l\ cr}$ від початкового радіусу мікробульбашок R_0 для трьох значень температури води: $T_{l0} = 20\ ^\circ\text{C}$, $40\ ^\circ\text{C}$ та $50\ ^\circ\text{C}$.

Формули (2.54) та (2.56) 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 в склад парогазової суміші всередині бульбашки (N_2 , O_2 , H_2 , CO_2 , Ar , H_2S тощо) [11, 123, 169, 290, 321]. Як

неконденсований газ мікробульбашка може містити суміш різних газів, наприклад повітря.

При вирішенні практичних задач кавітаційної дегазації рідини важливо знати кількість неконденсованого газу (повітря), яка міститься у вільному стані всередині рівноважних мікробульбашок. Парціальний тиск будь-якого неконденсованого газу всередині бульбашки p_{g0} розраховується з рівняння (2.49), якщо відомі тиск p_{l0} і температура T_{l0} рідини. Звідси, приймаючи газ ідеальним, з рівняння Клапейрона-Менделєєва знаходимо його густину

$$\rho_{g0} = \frac{p_{g0} \cdot M}{\tilde{R} \cdot T_{l0}}, \quad (2.57)$$

де M – молекулярна маса газу, а $\tilde{R}$ – газова стала.

Тоді маса газу, який міститься в бульбашці з радіусом R_0 дорівнює

$$m_g = \frac{4\pi R_0^3}{3} \cdot \rho_{g0} = \frac{4\pi R_0^3 \cdot M}{3\tilde{R} \cdot T_{l0}} \cdot p_{g0}. \quad (2.58)$$

З формули (2.57) і (2.58) випливає, що густина ρ_{g0} будь-якого газу, який міститься в бульбашці заданого розміру, а також його маса m_g пропорційні молекулярній масі цього газу M . Зазвичай приймається, що в швидкоплинних процесах ГД кавітації, на відміну від акустичної кавітації, маса неконденсованого газу в бульбашці залишається незмінною.

2.5. Моделювання сопла Вентурі

Будь які пристрої в яких виконується обговорені в розділі 1 умови виникнення кавітації використовують як кавітаційні реактори при виконанні різногалузевих наукових та практичних досліджень. Це можуть бути УЗ генератори, стаціонарні ГДКР типу сопел Вентурі, діафрагм або пластинок з отворами, ротаційні апарати, різноманітні вібраційні та пульсаційні апарати, відцентрові насоси тощо. На рис. 2.11, як приклад, наведена типова схема лабораторної установки для кавітаційної обробки рідини чи рідинних сумішей в режимі рециркуляції з застосуванням як

ГДКР типового сопла Вентурі, яке в повній мірі забезпечує виконання умов ініціювання кавітаційних ефектів.

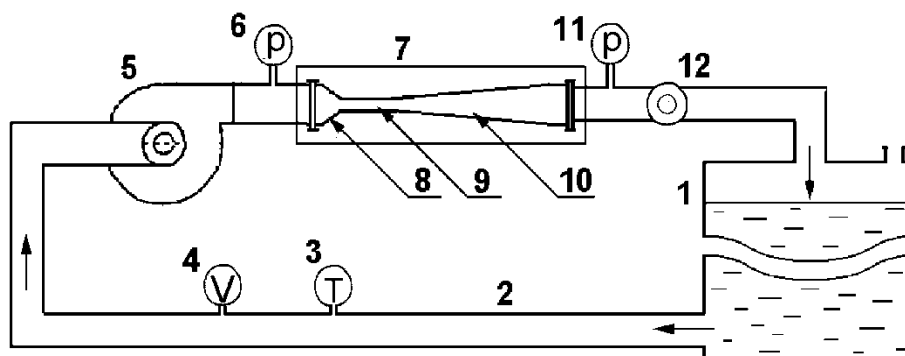


Рис. 2.11. Схема кавітаційної обробки рідини з застосуванням сопла Вентурі: 1 – завантажувальна ємність; 2 – трубопровід; 3 – термометр; 4 – ротаметр; 5 – відцентровий насос; 6, 11 – манометри; 7 – кавітаційний реактор (сопло Вентурі); 8 – конфузор; 9 – горловина сопла; 10 – дифузор; 12 – діафрагма зі змінною площею прохідного перерізу.

На схемі, зображеній на рис. 2.11 як кавітаційний реактор застосовується сопло Вентурі, однак в рециркуляційній лінії кавітаційної обробки рідини як кавітаційний реактор може бути застосований будь який пристрій в якому виконуються наведені вище умови кавітації.

Принципову схему типового сопла Вентурі, яке застосовується як кавітаційний реактор наведено на рис. 2.12.

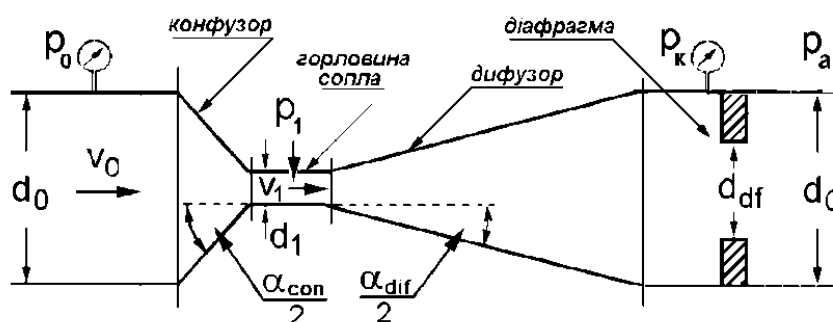


Рис. 2.12. Схема сопла Вентурі.

Сопло Вентурі складається з конфузора з кутом розкриття α_{con} , циліндричної горловини сопла діаметром d_1 і довжиною L_1 і дифузора з кутом розкриття α_{dif} . Вхідний діаметр конфузора та вихідний діаметр дифузора дорівнюють діаметру

трубопроводу d_0 . В трубі на виході з дифузора зазвичай розміщують круглу діафрагму зі змінним діаметром отвору d_{df} для варіації витрати рідини через сопло та тиску p_k на виході з сопла. Рідина в процесі обробки після проходження дифузора і діафрагми надходить в ємність тиск в якій зазвичай дорівнює атмосферному тиску p_a . Під дією тиску з насоса (поз. 5 на рис 2.11) рідина з завантажувальної ємності знову надходить на вхід конфузора під заданим тиском p_0 . Тиск на виході з дифузора p_k шляхом заданої зміни площі отвору діафрагми може варіюватись в інтервалі $p_0 \leq p_k \leq p_a$, що дозволяє регулювати швидкість рідини в трубопроводі v_0 і, відповідно, швидкість v_1 в горловині сопла.

2.5.1. Загальний розрахунок сопла Вентурі

При стаціонарній течії рідини в каналі складної геометрії, площа поперечного перерізу якого $S(x)$ плавно змінюється з відстанню x , значення швидкості потоку і тиску в рідині у кожній точці каналу можна розраховувати використовуючи рівняння Бернуллі, якщо відома аналітична залежність $S = f(x)$.

$$p_0 + \rho_l \frac{v_0^2}{2} = p_1 + \rho_l \frac{v_1^2}{2} + (\xi_{con} + \xi_1) \rho_l \frac{v_0^2}{2}, \quad (2.59)$$

де v_0 і p_0 – швидкість і тиск в потоці рідини на вході в конфузор; v_1 і p_1 – швидкість і тиск в потоці рідини в будь-якому довільному перерізі (в даному випадку, на виході з горловини сопла). Параметри ξ_{con} і ξ_1 – це коефіцієнти гідродинамічного опору конфузора та горловини з врахуванням втрат на тертя рідини. Враховуючи, що швидкість потоку в горловині v_1 пов'язана зі швидкістю v_0 співвідношенням $v_1 = v_0(d_0/d_1)^2$ рівняння (2.59) перепишемо у вигляді

$$p_0 + \rho_l \frac{v_0^2}{2} = p_1 + \rho_l \frac{v_0^2}{2} \left(\frac{d_0}{d_1} \right)^4 + (\xi_{con} + \xi_1) \rho_l \frac{v_0^2}{2}, \quad (2.60)$$

звідки тиск на виході з горловини сопла визначається за формулою

$$p_1 = p_0 - \rho_l \frac{v_0^2}{2} \left[\left(\frac{d_0}{d_1} \right)^4 - 1 + \xi_{con} + \xi_1 \right]. \quad (2.61)$$

При заданій геометрії сопла, тобто заданих значень $d_0, d_1, L_1, d_{df}, \alpha_{con}, \alpha_{dif}$, тиск p_1 і швидкість v_1 на виході з горловини сопла можна розрахувати, якщо відома швидкість потоку в трубопроводі v_0 .

Застосувавши рівняння Бернуллі для двох перерізів – на вході в сопло, де тиск $p = p_0$, і на виході з сопла – після діафрагми, де тиск $p = p_a$, визначимо масову витрату рідини через сопло

$$G_m = S_0 \sqrt{\frac{2\rho_l(p_0 - p_k)}{(\xi_{con} + \xi_1 + \xi_{dif} + \xi_{df})}} \quad (2.62)$$

та швидкість потоку v_0 на вході в сопло

$$v_0 = \sqrt{\frac{2(p_0 - p_k)}{\rho_l(\xi_{con} + \xi_1 + \xi_{dif} + \xi_{df})}}, \quad (2.63)$$

де ξ_{dif} і ξ_{df} – відповідно, коефіцієнти гідродинамічного опору дифузора та діафрагми.

Нижче наведені формули для розрахунку коефіцієнтів гідродинамічних опорів конфузора ξ_{con} та дифузора ξ_{dif} в залежності від величини їх кутів розкриття, гідродинамічного опору діафрагми ξ_{df} залежно від діаметра отвору, а також коефіцієнту тертя в горловині ξ_1 , які наведені в довідниках з гідродинаміки.

Падіння напору в горловині сопла, як і в будь-якій циліндричній трубі з постійним діаметром, зумовлено лише втратами на тертя.

Коефіцієнт опору в горловині з довжиною L_{thr} і діаметром d_1 визначається за відомою формулою Дарсі, яка для розрахунку втрати напору через швидкість на вході в сопло v_0 записується у вигляді

$$\xi_{thr} = \frac{\lambda_{fr} L_{thr}}{d_1} \cdot \left(\frac{d_0}{d_1}\right)^4. \quad (2.64)$$

де $\lambda_{fr} = f(Re)$ – коефіцієнт тертя, який можна обчислити за формулами [425]: $\lambda_{fr} = 16/Re$ при $Re < 2100$ та $\lambda_{fr} = 0,0791/Re^{0,25}$ при $Re > 2100$.

При застосуванні трубки Вентурі як гідродинамічного реактора, в якому швидкість потоку через сопло доволі висока і течія високотурбулентна ($Re \propto 10^5$) для інженерних розрахунків з задовільною точністю можна застосовувати постійне значення коефіцієнта тертя $\lambda_{fr} = 0,004$. Для більш точних розрахунків слід користуватися формулою Блазіуса $\lambda_{fr} = 0,0791/Re^{0,25}$ з урахуванням ступеня шорсткості внутрішньої поверхні сопла.

Рекомендоване значення $\lambda_{fr} = 0,004$ застосовується далі при розрахунках гідравлічних опорів конфузора і дифузора.

Конфузором називається конічна труба з поступовим зменшенням діаметра і площі поперечного перерізу. Течія рідини в конфузорі супроводжується збільшенням її швидкості та падінням тиску. У конфузорі є лише втрати на тертя.

Коефіцієнт гідродинамічного опору конфузора ξ_{con} визначаємо за формулою

$$\xi_{con} = \frac{\lambda_{fr}}{8 \sin(\alpha_{con} / 2)} \left(\frac{S_0^2}{S_1^2} - 1 \right) = \frac{\lambda_{fr}}{8 \sin(\alpha_{con} / 2)} \left(\frac{d_0^4}{d_1^4} - 1 \right), \quad (2.65)$$

де S_0/S_1 – ступінь звуження каналу.

Дифузором називається конічна труба з поступовим збільшення діаметру та площі поперечного перерізу. Течія рідини в дифузорі супроводжується зменшенням її швидкості та збільшенням тиску, а отже, перетворенням кінетичної енергії рідини на потенціальну енергію тиску. У дифузорі може відбуватися відрив основного потоку від стінки та вихореутворення, причому інтенсивність цих явищ зростає зі збільшенням кута розкриття. Крім того, в дифузорі є і звичайні втрати на тертя, подібні до тих, які виникають у трубах постійного перерізу. Повну втрату напору в дифузорі або падіння тиску розглядають як суму двох чинників – втрати тиску на тертя та розширення (вихореутворення).

Коефіцієнт гідродинамічного опору дифузора ξ_{dif} з урахуванням обох чинників можна записати у вигляді формули

$$\xi_{dif} = \frac{\lambda_{fr}}{8 \sin(\alpha_{dif} / 2)} \left(\frac{S_0^2}{S_1^2} - 1 \right) + \sin \alpha_{dif} \left(\frac{S_0^2}{S_1^2} - 1 \right)^2. \quad (2.66)$$

Діафрагма на виході з сопла Вентурі застосовується для того, щоб змінювати або регулювати тиск p_k на виході з сопла в інтервалі між тиском p_0 на вході в сопло, який вимірюється манометром (поз. 6 на рис. 2.11), і тиском p_a в завантажувальній ємності (поз. 1 на рис. 2.11). Тиск в завантажувальній камері, яка в багатьох дослідженнях з кавітації сполучена з атмосферою, як правило, дорівнює атмосферному тиску p_a . Але, приміром, в задачах дегазації завантажувальна ємність сполучена з вакуумним насосом, який має підтримувати в ємності постійний, бажано мінімальний, тиск p_{vac} . Тому при вирішенні задач дегазації у відповідних формулах треба замінити тиск $p_a = 1$ атм на заданий постійний тиск $p_{vac} \propto 0,05 \div 0,2$ атм, який в змозі забезпечити вакуум-насос.

Отже, в рециркуляційній схемі дегазації діафрагма взагалі не потрібна ($\xi_{df} \equiv 0$), а в наведений тут розрахункових формулах параметр ξ_{df} відсутній.

Коефіцієнт опору діафрагми з площею перерізу отвору діафрагми S_{df} визначається зазвичай за відповідними графіками, що містяться в довідниках та посібниках, або за наближеною емпіричною формулою

$$\xi_{df} = \frac{2,5(1 - S_{df} / S_0)}{S_{df}^2 / S_0^2}, \quad (2.67)$$

яка доволі точно апроксимує експериментальні дані.

Підставляючи значення гідродинамічних коефіцієнтів у рівняння (2.62) та (2.63) при заданих значеннях кутів розкриття конфузора і дифузора, діаметра і довжини горловини, розраховуємо масову витрат рідини через сопло G_m , а також швидкість потоку на вході в конфузور v_0 , якщо задано величину тиску на вході в сопло p_0 .

З літератури відомо [51, 67, 198], що в межах кута розкриття конфузора α_{con} від 30° до 60° коефіцієнти опору конфузора є оптимальними. В межах розкриття кута дифузора α_{dif} від 6° до 15° коефіцієнти опору дифузора також оптимальні. Оптимальна довжина горловини сопла знаходиться в межах $d_1 \leq L_1 \leq 2d_1$.

Таким чином, при застосуванні сопла Вентурі для кавітаційної обробки рідини чи рідинних сумішей з урахуванням наведених вище інтервалів оптимальних значень параметрів α_{con} , α_{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 . Підставляючи у формулу (2.63) задані значення цих величин (при постійних оптимальних значеннях інших геометричних параметрів) розрахуємо швидкості v_0 . Після підстановки значення швидкості v_0 в рівняння (2.61) знаходимо тиск на виході з горловини p_1 , який власне і визначає інтенсивність кавітаційних процесів в соплі.

2.5.2. Розподіл тиску і швидкості в потоці рідини по довжині сопла

Гідродинамічна кавітація в соплі Вентурі просто генерується шляхом пропускання рідини через звуження каналу. У звуженні каналу (в горловині сопла) у відповідності до закону Бернуллі швидкість течії v_1 і питома кінетична енергія рідини $E_{kin\ 1} = \rho_l v_1^2 / 2$ збільшується за рахунок зменшення тиску в рідині p_1 , тобто питомої потенціальної енергії потоку $E_{pot\ 1}$. При ефективному дроселюванні тиск у горловині сопла падає нижче тиску насиченої пари рідини ($p_l < p_{sat}(T_l)$) викликаючи активацію присутніх у рідині парогазових зародків та їх безповоротне зростання, тобто ізотермічне кавітаційне закипання рідини. Далі, по мірі розширення потоку в дифузорі швидкість течії після виходу з горловини поступово зменшується, а тиск в рідині поступово зростає. Коли величина тиску в локальній зоні каналу перевищить тиск насиченої пари ($p_l(x) > p_{sat}(T_l)$), відбувається швидке стиснення бульбашок та їх наступний колапс. На рис. 2.13 зображено, як для одного з заданих робочих режимів (p_l, p_k) і геометрій сопла змінюється тиск і швидкість в потоці рідини при її проходженні через сопла Вентурі в залежності від ступеня звуження каналу d_1/d_0 .

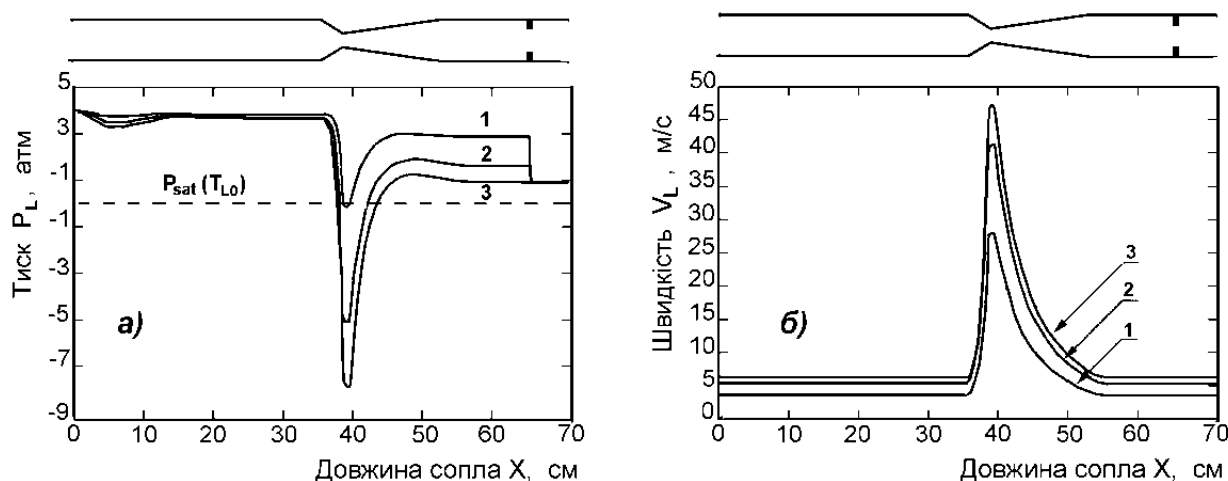


Рис. 2.13. Розподіл тиску $p_l = f(x)$ (а) і швидкості $v_l = f(x)$ (б) в потоці рідини по довжині сопла Вентурі в залежності від ступеня звуження каналу: 1 – $d_1/d_0 = 0,78$; 2 – $d_1/d_0 = 0,50$; 3 – $d_1/d_0 = 0,42$.

З рисунку 2.13 а видно, що при високих швидкостях потоку на вході в сопло і при достатньому звуженні каналу тиски в рідині досягають високих негативних значень, що забезпечує активацію великого числа газових зародків і більш інтенсивні ефекти кавітації.

2.6. Моделювання процесів в роторно-пульсаційному апараті

2.6.1. Руйнування дисперсій в каналах і зазорах РПА

Для високочастотної обробки технологічних сумішей використовуються РПА циліндричного типу. За рахунок обертання ротора в зазорах між ротором і статором виникає тангенціальна (окружна) течія рідини, а під дією відцентрових сил рідина переміщується в радіальному напрямі. Очевидно, що в багатоступеневих РПА застосовуються ті ж самі ефекти, що і в одноступеневих. Зростає лише продуктивність і якість обробки.

Розглянемо основні гідродинамічні ефекти, що відбуваються в каналах і зазорах трьохциліндрового РПА з двома роторами і одним статором, який застосовано в даному дисертаційному дослідженні як ротаційний ГДКР для обробки рідинних дисперсних середовищ. На рис. 2.14 схематично показані основні

динамічні ефекти, що створюються в каналах і в міжциліндрових зазорах РПА «ротор-статор-ротор».



Рис. 2.14. Схематичне зображення динамічних механізмів ДІВЕ, що діють на дисперсію з час проходження через канали РПА.

Коли при обертанні роторів їх отвори на мить співпадають з отворами статорів площа перерізу каналу для проходження рідини буде найбільшою. В цей момент швидкість рідини через отвори стає максимальною, а гідравлічний опір мінімальним. При перекритті отворів роторів і статора рідина, що тече в каналах, різко гальмується, внаслідок чого в каналах першого ротора і статора створюється ефект гідравлічного удару з усіма супутніми явищами – стисненням рідини і виникненням надмірно високого тиску в зоні між першим ротором і статором. В зоні між статором і другим ротором і в каналах другого ротора, навпаки, створюється зона розрідження. В цей короткий проміжок часу рідина, що проходить через апарат, тече переважно лише в тангенціальному напрямі вздовж вузьких зазорів між ротором і статором у напрямі обертового руху ротора.

Розглянута картина відповідає одному півперіоду – від повного співпадання отворів ротора та статорів – до їх повного перекриття. В реальних апаратах з кутовою швидкістю ротора $\omega \propto 300 \text{ с}^{-1}$ період перекриття каналів складає

приблизно від 300 до 800 мкс в залежності від кількості отворів на окружності ротора (статора), що відповідає частоті перекриття каналів $f = 1,2 \div 3$ кГц.

Величина лінійної швидкості рідини в зазорі шириною δ змінюється у радіальному напрямі по ширині зазору від нуля (на поверхні статора) до величини лінійної швидкості поверхні ротора v_{rot} . Оскільки ширина зазору в РПА зазвичай знаходиться в інтервалі $\delta = 300 \div 600$ мкм, а лінійна швидкість ротора – в інтервалі $v_{rot} = 20 \div 40$ м/с, величини швидкості зсуву в зазорах $G_\delta = v_{rot}/\delta$ можуть досягати доволі великих значень.

Отже, як видно з рис. 2.14, при проходженні дисперсної рідинної суміші через канали і зазори РПА кожна дисперсія (тверда, рідка чи газова) зазнає з боку рідини сумарного динамічного впливу, який може призвести до її руйнування.

В міжциліндрових зазорах – це дія високих зсувних напружень $p_{sh} = G_\delta$.

В каналах роторів і статора силова дія на дисперсії пов'язана з кавітаційними ефектами – це періодичне стиснення та розрідження рідини всередині каналів, що супроводжується послідовним формуванням, зростанням та колапсом кавітаційних бульбашок з частотою перекриття каналів $f = 1,2 \div 3$ кГц.

Таким чином, кавітаційні явища, що 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, так і як акустичний реактор.

При зменшенні ширини зазору і збільшенні довжини каналів та їх кількості динамічний вплив на дисперсії створюється переважно за рахунок саме кавітаційних ефектів, оскільки дисперсії при проходженні через РПА більшу частину часу перебувають в каналах ротора і статора. В протилежному випадку силова дія на дисперсії створюється за рахунок дії зсувних напружень.

Ще одним механізмом руйнування дисперсій в РПА є проста механічна зрізувальна дія на крупну дисперсію, якщо її діаметр перевищує ширину зазору δ . Для твердих дисперсій це може бути основним механізмом їх руйнування.

Таким чином, 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.

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

2.6.2. Моделювання процесів деформування та руйнування дисперсій в зсувних течіях

Застосований в даній дисертаційній роботі РПА використовується насамперед для проведення процесів дегазації рідин, нейтралізації кислих конденсатів, а також для обробки суспензій з твердими дисперсіями з метою їх руйнування, для зменшення жорсткості води тощо.

Для аналізу процесів руйнування крапель емульсії і подрібнення газових дисперсій в зсувних потоках з високим швидкостями зсуву, зокрема при швидкій течії рідини у вузьких зазорах або поблизу стінок трубопроводу, було розроблено за участю здобувача спеціальну математичну модель [426].

Дана модель базується на основних положеннях розробленої в ІТТФ НАН України на якісно нових принципах математичної моделі деформації рідких дисперсій в нестационарних прискорених рідких та газових потоках [427]. Отже, модель [426] слід розглядати як подальшу модифікацію базової моделі [427] з точки зору можливості опису механізмів деформування і руйнування не тільки крапель але і газових бульбашок в зсувних течіях, які в базовій моделі не розглядаються.

Основним положенням базової моделі [427] є припущення, що на всіх стадіях деформації крапля приймає форму еліпсоїда обертання. Деформація краплі розглядається як переміщення центрів мас півкраплин, розділених площиною, що проходить через геометричний центр краплі і ортогональна до напрямку швидкості

потoku x . Коли центри мас обох півкраплин переміщуються уздовж координати x в напрямку центру краплі, сферична крапля деформується в сплющений еліпсоїд, а коли одна з них переміщується в протилежному напрямі відносно геометричного центру краплі, крапля приймає форму видовженого еліпсоїда, що відповідає її поведінці в зсувних течіях. В моделі [427] надано систему рівнянь, які без застосування емпіричних підгоночних параметрів описують деформацію краплі з урахуванням визначальних теплофізичних факторів, таких як густини ρ_c , ρ_d та в'язкості μ_c , μ_d , відповідно суцільної та дисперсної фази, а також міжфазний натяг рідини σ . Деформована сферична крапля з початковим радіусом R розглядається як еліпсоїд обертання з головною піввіссю a і малими півосями $b = \sqrt{R^3/a}$, а ступінь деформації визначається параметром a/R .

Саме ці положення застосовано в моделі [426] для аналізу деформації і руйнування крапель та газових бульбашок в зсувних потоках.

Проблема деформування і руйнування крапель в зсувних потоках становить науковий і практичний інтерес і привертає увагу дослідників протягом останніх десятиліть. З теоретичної точки зору задача деформування крапель надзвичайно складна. Рівняння руху потрібно вирішувати для течії як всередині, так і в околиці краплі з граничними умовами на поверхнях, форма яких заздалегідь не відома і визначається в процесі вирішення. Докладний огляд і аналіз публікацій по деформуванню та руйнуванню крапель в зсувних течіях, починаючи з основоположних досліджень Дж. Тейлора 30-х років минулого століття [428, 429], викладений в роботах [430–432].

В цих роботах фізична задача визначається трьома безрозмірними числами: числом Рейнольдса $Re = \rho_c G_{sh} R^2 / \mu_c$, капілярним числом $Ca = \mu_c G_{sh} R / \sigma$ і відношенням в'язкостей фаз $\lambda = \mu_d / \mu_c$. Тут $G_{sh} = dv_x / dy$ – зсувна швидкість, де v_x – аксіальна швидкість течії в напрямі потоку.

Слід зазначити, що в зв'язку з експериментальними труднощами проведення зсуву дана задача, починаючи з робіт Дж. Тейлора і по теперішній час вирішується

переважно для стоксівських режимів течії при $Re \ll 1$ і невеликих швидкостей зсуву ($G_{sh} \propto 0,1 \div 5 \text{ с}^{-1}$) [429–434], що на порядки менше тих величин, що спостерігаються в зазорах РПА. Критерій руйнування крапель зазвичай асоціюється з критичним капілярним числом Ca_{cr} причому певну роль в цих процесах відіграє величина відношення в'язкостей $\lambda = \mu_d/\mu_c$ [428–431].

В перших роботах Дж. Тейлора [428, 429] встановлено, що при докритичних значеннях капілярного числа ($Ca < Ca_{cr}$) крапля стабілізується у формі витягнутого еліпсоїда. При $\lambda \leq 1$ видовжені краплі зберігають свою стійкість лише за малих швидкостях зсуву G_{sh} . При досягненні певного критичного значення G_{cr} відбувається незворотна деформація краплі (так званий «вибух») – крапля спонтанно видовжується, приймаючи форму циліндра з вузькими перемичками, і потім руйнується, утворюючи дочірні краплини і малі фрагменти. При $\lambda \ll 1$ величина граничної швидкості зсуву G_{cr} , необхідна для руйнування краплі доволі велика і крапля сильно деформується, зберігаючи видовжену форму з загостреними кінцями аж до максимальних швидкостей зсуву, після чого дробиться на дрібні краплини.

При $\lambda > 1$ крапля приймає форму злегка видовженого еліпсоїда, яка не залежить від подальшого збільшення швидкості зсуву, а при досягненні критичного значення $\lambda_{cr} \geq 3$ дроблення краплі стає неможливим навіть при дуже великих швидкостях.

Ці закономірності, які згодом були підтверджені в експериментальних дослідженнях інших авторів [430–436] стали основою теоретичних розробок з цієї проблеми. Слід зазначити, що до цього часу відсутні теоретичні передумови, які б могли з єдиних позицій пояснити таку неоднозначну поведінку крапель у зсувних течіях при зміні режимних параметрів. Чисельні дослідження з даної проблеми базуються, в основному, на використанні методу граничних інтегралів, який дозволяє перетворити течії всередині і в оточенні краплі в форму, яка включає тільки елементи самої поверхні за умови $Re \ll 1$ [434, 435]. Моделювання

руйнування крапель в зсувних течія в стоксівському режимі проводилося також з використанням методів вирішення решіткових рівнянь Больцмана [436].

Незважаючи на суттєві досягнення в області чисельних досліджень процесів деформації і дроблення крапель в зсувних течіях, до цього часу без відповіді залишаються багато важливих якісних питань. Зокрема, досі не визначено механізми руйнування краплі і як вони залежать від параметрів системи, включаючи ступінь деформації краплі, а головне, як відбувається деформування та руйнування краплини 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 [426]. Ця модель, яка, як згадано вище, побудована на основних положеннях базової моделі деформації крапель рідини в нестационарних газових та рідинних потоках [427], вперше дозволяє описати процеси деформації і руйнування дисперсій в зсувних течіях в широкому інтервалі зміни режимних параметрів.

В моделі розглядається одномірна плоска зсувна течія рідини з густиною ρ_c і в'язкістю μ_c . Швидкість потоку v_x спрямована вздовж координати x , а зсувна швидкість $G_{sh} = dv_x/dy$ – вздовж координати y . В потоці рідини знаходиться крапля іншої нерозчинної в ній рідини (або газова бульбашка), яка переміщується з потоком в напрямі x зі швидкістю потоку $v_x(y_0)$.

Деформована крапля розглядається як видовжений еліпсоїд обертання з головною піввіссю a і малими півосями $b = \sqrt{R^3/a}$. Поточні значення осей a і b , ексцентриситет еліпсоїда $e = \sqrt{1 - b^2/a^2}$ та площа його поверхні $S = f(a)$ легко розраховуються за відомими геометричними формулами. Ступінь деформації краплі в зсувних течіях, так само, як і в базовій моделі, визначається параметром a/R .

Розміщуючи початок декартових координат в центрі краплі ($x_0 = 0, y_0 = 0$) розглядаємо лише рух потоку відносно краплі вважаючи її нерухомою. Для плоскої зсувної течії поле швидкостей потоку відносно краплі $w_x(y - y_0) = v_x(y) - v_x(y_0)$

є симетричним. При розтягуванні краплі потоком в напрямку x координата y центру півкраплі не змінюється.

На рис. 2.15 наведено схему переміщення центру мас півкраплі $r_s(\tau)$ і зміни кута орієнтації $\alpha(\tau)$ в процесі деформації сферичної краплі в зсувній течії.

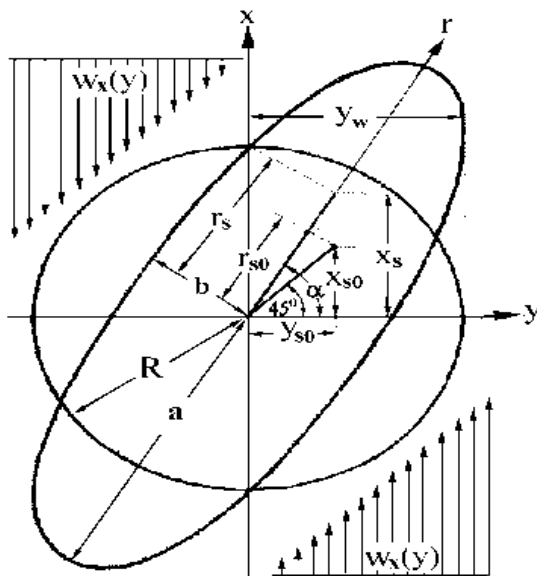


Рис. 2.15. Схематичне зображення переміщення центру мас півкраплі $r_s(\tau)$ і зміни кута орієнтації $\alpha(\tau)$ в процесі деформації сферичної краплі в зсувній течії.

Як видно з рис. 2.15, відстань між центром мас півкраплі і геометричним центром самої краплі визначається параметром $r_s(\tau) = \sqrt{x_s^2 + y_{s0}^2}$, який пов'язаний з довжиною a співвідношенням $r_s = 3a/8$. Орієнтацію краплі прийнято визначати кутом α між напрямком вектора $\vec{r}$ і напрямом осі y [428, 429]. В даній моделі він безпосередньо пов'язаний зі ступенем деформації a/R співвідношенням

$$\alpha = \arctg(x_s/y_{s0}) = \arccos\left(\frac{\sqrt{2}}{a/R}\right). \quad (2.68)$$

При обтікання краплі потоком на її поверхню з боку оточуючої рідини діє гідродинамічна сила F_ξ . Розподіл тиску з боку рідини по поверхні краплі має бути симетричним відносно центру краплі (x_0, y_0) . Сили F_ξ , що діють на кожен півкраплю по координаті x , рівні за величиною, але протилежні за напрямом і визначаються за стандартною формулою

$$F_{\xi} = \frac{\xi \cdot \rho_c \pi b \cdot (y_w)^3 G^2}{8}, \quad (2.69)$$

де $y_w = a \cdot ((R/a)^3 \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha)$, а коефіцієнт гідродинамічного опору ξ розраховується з рівняння

$$\xi = \left(\frac{16}{\text{Re}} + \frac{2,2}{\text{Re}^{0,5}} + 0,6 \right) \cdot \left(\frac{1,5\lambda + 1}{\lambda + 1} \right), \quad (2.70)$$

де $\lambda = \mu_d/\mu_c$ – співвідношення в'язкостей фаз, а $\text{Re} = \rho_c G R^2 / \mu_c$.

Зміненню форми краплі під дією сил F_{ξ} , протидіють капілярна сила F_{σ} , яка прагне повернути краплю до сферичної форми, а також сила в'язкості F_{μ} , пропорційна радіусу краплі R , ефективній в'язкості системи $\mu_{eff} = \mu_d + 0,6\mu_c$ та швидкості деформації $da/d\tau$.

Капілярна сила F_{σ} розглядається як відношення приросту енергії поверхні краплі при її деформуванні $dE_s = \sigma \cdot dS$ до зміщення центру мас півкраплі dr_s . Теоретичний аналіз показав, що при деформації сферичної краплі у форму видовженого еліпсоїда обертання капілярна сила визначається з рівняння

$$F_{\sigma} = \sigma \frac{dS}{dr_s} = \frac{16\pi R^3 \sigma}{3a^2} \left[\frac{0,5 \cdot (R/a)^{3/2} (1 - 4 \cdot (R/a)^3) \cdot \arcsin e}{e^3} + \frac{1,5}{e^2} - 1 \right], \quad (2.71)$$

В межах моделі [426] отримано простий критерій руйнування крапель в зсувних течіях. Як показано вище, деформація крапель обумовлена дією трьох сил – F_{ξ} , F_{σ} та F_{μ} . Деформована крапля зберігає стабільну форму видовженого еліпсоїда за умови що складова F_{ξ} і зворотна сила F_{σ} стають рівними. У відповідності до в'язко-пружної моделі Кельвіна-Фойгта [437] при деформуванні тіла пружні сили, що перешкоджають деформуванню, повинні зростати зі збільшенням ступеня деформації. В даному випадку як пружні сили виступають капілярні сили. При деформуванні краплі у форму сплющеного еліпсоїда капілярна сила дійсно безмежно зростає зі збільшенням ступеня деформації [427]. При деформації краплі у форму видовженого еліпсоїда ця закономірність порушується. Згідно з формулою (2.71) пропорційність пружної капілярної сили ступеню деформації дотримується лише до певного значення ступеня деформації $(a/R)_{cr}$. Перевищення цього

критичного значення призводить до плавного зниження капілярної сили F_σ . 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 чисто геометричним фактором, котрий не залежить ні від теплофізичних характеристик обох фаз, ні від режимних параметрів потоку, і може розглядатися як фізична константа, котра визначається як $(a/R)_{cr} = 2,2$.

Для підтвердження достовірності і універсальності цього критерію було проведено обчислювальний експеримент по розрахунку залежності капілярної сили F_σ від ступеня деформації краплі a/R . Точність оцінки цієї величини, яку можна характеризувати як критерій руйнування рідинних і газових дисперсій в зсувних потоках, визначається мірою наближення краплі, що деформується, до форми подовженого еліпсоїда. Однак незалежно від точності оцінки критичного значення ступеня деформації, отриманий в межах моделі результат переконливо пояснює причину явища так званого «вибухового» подовження та руйнування крапель при невисоких значеннях капілярного числа Ca , що вперше спостерігалось в експериментах Тейлора і згодом фіксувалося іншими експериментаторами.

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.

На рис. 2.16 представлено залежності капілярної сили $F_\sigma = f(a/R)$, розраховані за рівнянням (2.71) для трьох систем: 1 – краплі диметикону в касторовій олії; 2 – краплі толуолу у воді; 3 – краплі води у моторній оліві при різних режимах. Одержані результати розкривають важливу, невідому раніше, особливість впливу капілярних сил на деформування краплі. З рисунку 2.16 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.

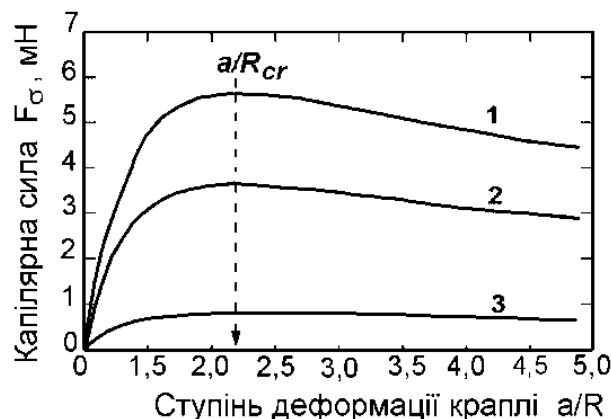


Рис. 2.16. Характер зміни величини капілярної сили F_σ в залежності від ступеня деформації a/R в процесі деформації крапель в зсувних потоках:

$$1 - \rho_d = 965 \text{ кг/м}^3; \rho_c = 980 \text{ кг/м}^3; \mu_d = 0,05 \text{ Па} \cdot \text{с}; \mu_c = 0,62 \text{ Па} \cdot \text{с}; \\ \sigma = 9,1 \text{ мН/м}; R = 0,3 \text{ мм}; G_{sh} = 0,2 \text{ с}^{-1};$$

$$2 - \rho_d = 800 \text{ кг/м}^3; \rho_c = 1000 \text{ кг/м}^3; \mu_d = 0,6 \text{ Па} \cdot \text{с}; \mu_c = 1,0 \text{ Па} \cdot \text{с}; \\ \sigma = 35 \text{ мН/м}; R = 0,3 \text{ мм}; G_{sh} = 439 \text{ с}^{-1};$$

$$3 - \rho_d = 1000 \text{ кг/м}^3; \rho_c = 1000 \text{ кг/м}^3; \mu_d = 1,0 \text{ Па} \cdot \text{с}; \mu_c = 200 \text{ Па} \cdot \text{с}; \\ \sigma = 29 \text{ мН/м}; R = 1 \text{ мм}; G_{sh} = 77 \text{ с}^{-1}.$$

Для ілюстрації на рис. 2.17 наведені фотографії крапель диметикону в процесі їх послідовного розширення в зсувному потоці (течії Куетта) касторової олії в докритичному ($Ca = 0,98Ca_{cr}$) (**a**) та в надкритичному ($Ca = 1,01Ca_{cr}$) режимі течії (**б**) за даними роботи [433]. Аналіз фотографій доводить, що форма стабілізованої краплі відповідає умові $a/R \approx 2,2$.

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 докритичному режимі при числах Ca близьких до Ca_{cr} відповідає значенням $a/R = 2,0 \div 2,3$ [429–433]. Слід зазначити, що критерій руйнування крапель в зсувних течія $(a/R)_{cr} = 2,2$ одержано в рамках моделі в припущенні, що крапля на будь-якій стадії деформації має форму еліпсоїда обертання.

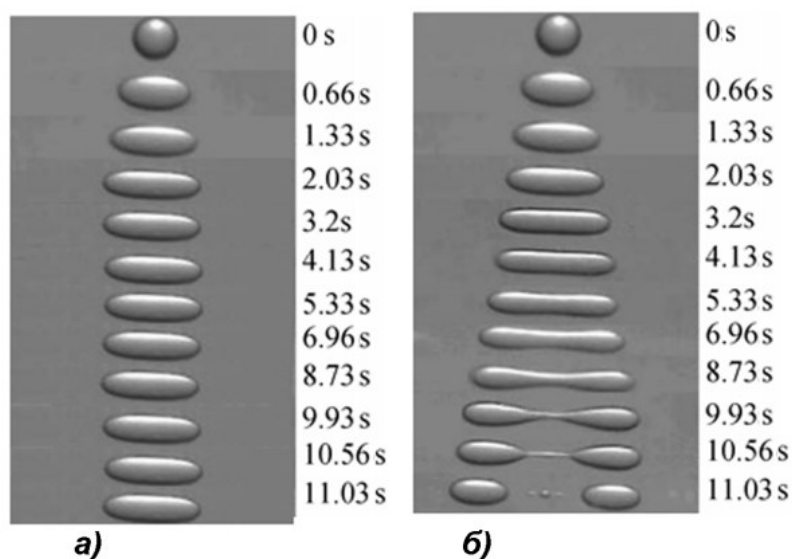


Рис. 2.17. Фотографії послідовних стадій деформації краплі диметикону в зсувній течії касторової олії при докритичному (а) та надкритичному (б) значенні капілярного числа Ca . За даними роботи [433].

Зрозуміло, що в реальних течіях, особливо при високих ступенях деформації краплі, достовірність цього припущення може дещо порушуватися.

2.6.3. Моделювання течії рідини через радіальні канали РПА

Розглянемо особливості роботи РПА стосовно аналізу кавітаційних ефектів, ініційованих у цих апаратах. Як базову модель РПА використовуємо конструкцію апарата циліндричного типу, що складається з трьох коаксіально розміщених циліндричних елементів – двох роторів і розміщеного між ними статора. Перевага такої конструкції апарата у порівняння з трьохциліндровим апаратом з одним ротором полягає в тому, що за рахунок сумарної відцентрової дії двох роторів продуктивність апарата зростає вдвічі без необхідності застосовувати відцентровий насос в рециркуляційній лінії.

Схема апарата представлена на рис. 2.18. Задані основні конструктивні параметри РПА: внутрішній та зовнішні радіуси обох роторів і статора, довжина каналів роторів і статора, кутова швидкість роторів, кількість отворів на межі ротор-статор, ширина отворів, висота отворів, ширина проміжку між отворами, ширина зазорів між роторами і статором. Основні гідродинамічні та кавітаційні процеси, які

відбуваються в циліндричних роторних апаратах детально розглядаються в роботах [217–221, 360, 362, 403].

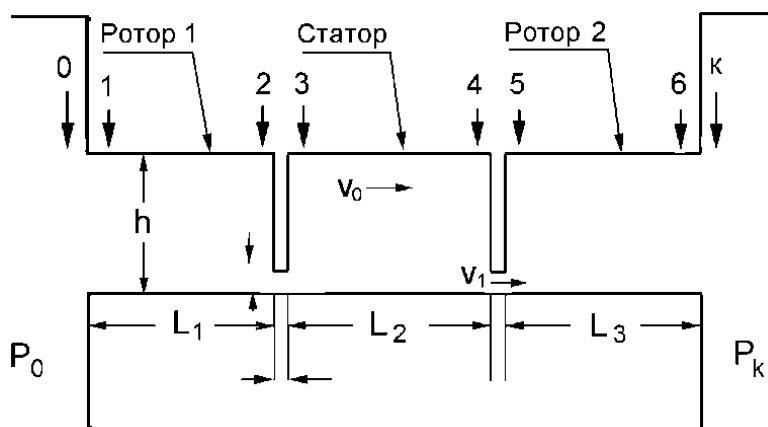


Рис. 2.18. Схематичне зображення каналів РПА.

Дослідження проводили при заданих значеннях тиску на вході p_0 та на виході p_k з РПА. Величини густини, в'язкості і теплопровідності модельної рідини, а також значення тиску насиченої пари і теплоти випаровування визначали як функції від температури.

Створено математичну модель гідродинамічних процесів в РПА, 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. Нижче наведено систему основних рівнянь математичної моделі течії рідини через канали РПА.

Зміна тиску в каналах РПА у локальних точках 1–6, показаних на рис. 2.18:

$$p_1 = p_0 - (1 + \xi_{en}) \frac{G_m^2}{2\rho_l S_0^2} + p_{\omega 1} - \rho_l \frac{d\varphi_1}{d\tau}; \quad (2.72)$$

$$p_2 = p_0 - \left(1 + \xi_{en} + \frac{\lambda L_1}{D_{ef 1}}\right) \frac{G_m^2}{2\rho_l S_0^2} + p_{\omega 1} - \rho_l \frac{d\varphi_2}{d\tau}; \quad (2.73)$$

$$p_3 = p_0 - \left(1 + \xi_{en} + \frac{\lambda L_1}{D_{ef 1}} + \xi_{2-3}\right) \frac{G_m^2}{2\rho_l S_0^2} + p_{\omega 1} - \rho_l \frac{d\varphi_3}{d\tau}; \quad (2.74)$$

$$p_4 = p_0 - \left(1 + \xi_{en} + \frac{\lambda L_1}{D_{ef\ 1}} + \xi_{2-3} + \frac{\lambda L_2}{D_{ef\ 2}}\right) \frac{G_m^2}{2\rho_l S_0^2} + p_{\omega 1} - \rho_l \frac{d\varphi_4}{d\tau}; \quad (2.75)$$

$$p_5 = p_0 - \left(1 + \xi_{en} + \frac{\lambda L_1}{D_{ef\ 1}} + \xi_{2-3} + \frac{\lambda L_2}{D_{ef\ 2}} + \xi_{3-4}\right) \frac{G_m^2}{2\rho_l S_0^2} + p_{\omega 2} - \rho_l \frac{d\varphi_5}{d\tau}; \quad (2.76)$$

$$p_6 = p_0 - \left(1 + \xi_{en} + \frac{\lambda L_1}{D_{ef\ 1}} + \xi_{2-3} + \frac{\lambda L_2}{D_{ef\ 2}} + \xi_{3-4} + \frac{\lambda L_3}{D_{ef\ 3}}\right) \frac{G_m^2}{2\rho_l S_0^2} + \\ + p_{\omega 2} - \rho_l \frac{d\varphi_6}{d\tau}; \quad (2.77)$$

$$\frac{d\varphi_k}{d\tau} = 0; \quad (2.78)$$

$$p_6 = p_k, \quad (2.79)$$

де p_0, p_k – задані значення тисків на вході і на виході з РПА;

$p_i(\tau)$ – поточні значення тисків в локальних точках $i \in (1 - 6)$;

$p_{\omega 1} = \rho_l \cdot \omega^2 (R_2^2 - R_1^2)/2$; $p_{\omega 2} = \rho_l \cdot \omega^2 (R_6^2 - R_5^2)/2$;

$\varphi_i(\tau)$ – поточні значення потенціалів швидкості в локальних точках $i \in (1 - 6)$;

$d\varphi_i/d\tau$ – швидкість зміни потенціалів $\varphi_i(\tau)$ в локальних точках $i \in (1 - 6)$;

L_1, L_2, L_3 – довжина каналів, відповідно, I ротора, статора, II ротора;

$D_{ef\ 1}, D_{ef\ 2}, D_{ef\ 3}$ – ефективні діаметри I ротора, статора та II ротора;

ρ_l – густина рідини; λ – коефіцієнт тертя;

R_1, R_2 – радіуси внутрішньої і зовнішньої поверхні I ротора;

R_3, R_4 – радіуси внутрішньої і зовнішньої поверхні статора;

R_5, R_6 – радіуси внутрішньої і зовнішньої поверхні II ротора;

ω – кутова швидкість роторів;

ξ_{en} – гідравлічні опори на вході та на виході з РПА;

ξ_{2-3}, ξ_{4-5} – гідравлічні опори зазорів між ротором і статором;

$G_m(\tau)$ – поточне значення масової витрати рідини через канали РПА, яка визначається з рівняння

$$G_m = \frac{2\rho_l \cdot [(p_0 - p_k) + p_{\omega 1} + p_{\omega 2}]}{\xi_{en} + \lambda L_1/D_{ef 1} + \lambda L_2/D_{ef 2} + \lambda L_3/D_{ef 3} + \xi_{2-3} + \xi_{4-5}}. \quad (2.80)$$

Проведення чисельних розрахунків по моделі дозволяє визначити величини масової витрати, лінійної швидкості потоку, прискорення, тиску в локальній точці каналу в будь-який момент часу. Це дає змогу описати розподіл лінійних швидкостей потоку і тисків по довжині каналів РПА в заданий момент часу або ж описати зміни цих параметрів з часом в певній локальній точці.

Дана модель описує ізотермічний процес течії через канали без врахування нагрівання рідини за рахунок дисипації кінетичної енергії і перетворення її в теплову та без врахування теплообміну між рідиною і стінками каналу. Це в певній мірі справедливо для низьков'язких рідини, наприклад, води, яка є основним об'єктом даного дослідження. Крім того, при застосуванні РПА як кавітаційного реактора в рециркуляційній лінії слід взяти до уваги, що за один цикл рециркуляції нагрівання рідини незначне, а в приймальній ємності відбувається штучне охолодження рідини.

В'язкість рідини в наведених вище рівняннях враховується через коефіцієнт тертя λ . Як показано в підрозділі 2.5, коефіцієнт тертя є функцією числа Рейнольдса, який містить в'язкість, для ізотермічних систем залежність $\lambda = f(\text{Re})$ в широкому інтервалі зміни числа Re визначається за відомими рівняннями [425].

За рівняннями моделі течії рідини через канали РПА зроблено деякі розрахунки.

Зміна сумарної площі прохідного перерізу каналів РПА з часом наведена на рис. 2.19. При кутовій швидкості обертання ротора $\omega = 314$ рад/с канали перекриваються приблизно через кожні 170 мкс.

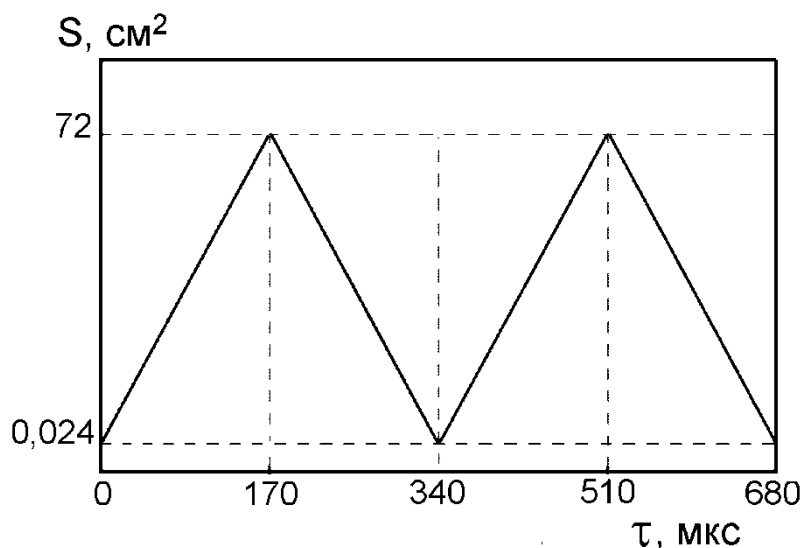


Рис. 2.19. Зміна з часом сумарної площі прохідного перерізу каналів РПА протягом двох періодів перекриття отворів роторів і статора.

Відповідно, як показано на рис. 2.20, швидкість потоку через канали РПА періодично змінюється від 0,2 м/с до 4,6 м/с з кожним перекриттям отворів.

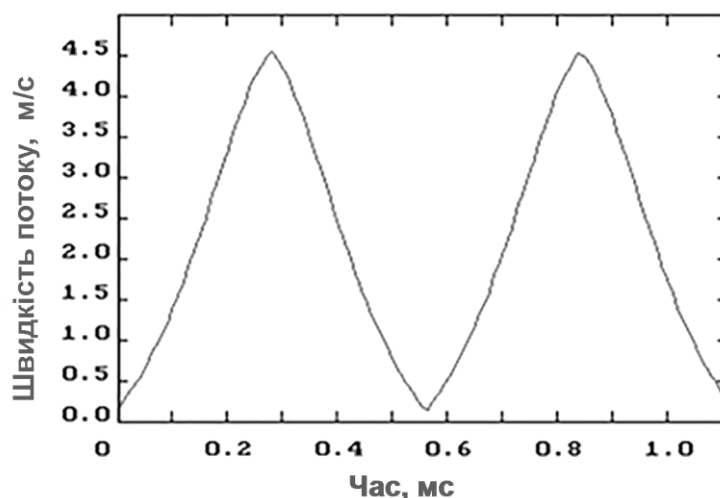


Рис. 2.20. Зміна з часом швидкість течії через канали РПА протягом двох періодів перекриття отворів роторів і статора.

В момент повного розкриття каналів, коли отвори роторів і статора взаємно співпадають, рідина вільно проходить через канали РПА. При подальшому перекритті отворів потік рідини в каналах поступово гальмується. В момент повного перекриття потік рідини через канали I ротора і статора повністю зупиняється. Але в каналах II ротора, який постійно сполучений через трубопровід з вакуумною

камерою (див. рис. 2.18), рідина за інерцією продовжує рухатись, внаслідок чого всередині каналів II ротора спостерігається розрив потоку рідини внаслідок різкого спадання тиску. В каналах I ротора і статора в момент повного перекриття отворів тиск, навпаки, різко зростає внаслідок стиснення рідини при гальмуванні потоку.

На рис. 2.21 показано як змінюється в часі протягом чотирьох періодів перекриття отворів тиск рідини всередині каналів першого ротора (крива 1) і статора (крива 2).

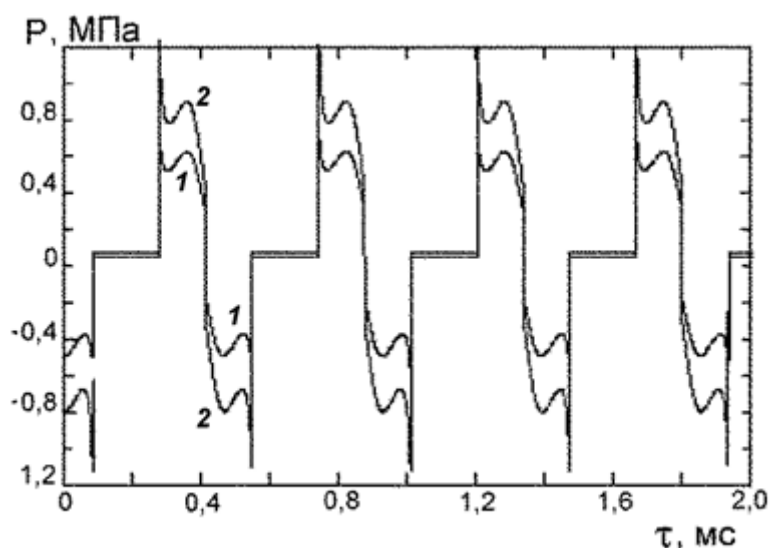


Рис. 2.21. Зміна тиску з часом в каналах першого ротора (крива 1) і статора (крива 2) протягом чотирьох періодів перекриття отворів роторів і статора.

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.

В приймальній камері відбувається розділення фаз, далі газ разом з парою виводиться з камери за допомогою вакуумного насоса, а рідина повертається в рециркуляційну лінію.

2.7. Висновки до розділу 2

1. На базі огляду досліджень тепломасообмінних та гідродинамічних процесів у парорідинних бульбашкових системах в межах принципу ДІВЕ встановлено, що інтенсифікація тепломасообміну та стимуляція гідродинамічних процесів з метою мінімізації енергетичних витрат базується на загальних підходах. Поведінка окремих бульбашок і бульбашкових структур у цих процесах описується загальною універсальною математичною моделлю, яка враховує особливості трансформації енергії в структурах, що розвиваються, а також специфіку перебігу мікро- і наномасштабних процесів, в тому числі в ізотермічному режимі, з чого логічно випливає поняття кавітації.

2. На базі створених в ІТТФ НАН України уніфікованої математичної моделі динаміки одиничної бульбашки (модель ДОБ) і математичної моделі динаміки ансамблю парових бульбашок (модель ДБА) розроблено математичну модель, що описує динаміку парогазових бульбашок у стисливій рідині з урахуванням ефектів сферичного гідравлічного удару.

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

4. Створено математичну модель для розрахунку сопла Вентурі як кавітаційного реактора з точним врахуванням гідравлічних опорів його складових. Ця модель надалі використовується як окрема субмодель в моделі ДБА, котра описує динаміку сукупності парогазових бульбашок. Дослідження розподілу тиску і

швидкості в потоці рідини по довжині сопла показує, що при високих швидкостях потоку на вході в сопло і при достатньому звуженні каналу тиски в рідині приймають високі негативні значення, що забезпечує активацію великої кількості газових зародків і більш інтенсивні ефекти кавітації.

5. Створено математичну модель деформування та руйнування рідких та газових дисперсій в зсувних течіях, яка дозволяє описати процеси деформації і руйнування дисперсій в зазорах РПА в широкому інтервалі зміни режимних параметрів. Вперше встановлено критерій незворотної деформації та наступного руйнування рідинних та газових дисперсій в зсувних течіях, який не залежить ні від теплофізичних властивостей суцільної та дисперсної фаз, 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.

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

РОЗДІЛ 3

ЗАСТОСУВАННЯ 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 [92, 105, 438].

Також проведено дослідження впливу гідродинамічної обробки на реологічні показники водно-оливної емульсії [439], а також на диспергування рослинної сировини в технології отримання паливного етанолу [440].

Дослідження впливу гідродинамічної обробки на реологічні показники водно-оливної емульсії проводили з метою вивчення зміни її густини і в'язкості при обробці в РПА при різних частотах пульсацій потоку та кількості циклів обробки. Встановлено, що збільшення кількості циклів обробки від 1 до 5 при частоті пульсацій потоку від 1 до 4 кГц, залежно від кількості водної фази, може збільшити в'язкість емульсії в 1,1–1,8 раза, яка залежить від середнього діаметра крапель дисперсної фази (води). Результати даного дослідження наведені в роботі [439] і можуть бути корисними при проектуванні та експлуатації паливних установок.

Дослідження впливу гідродинамічної обробки на диспергування рослинної сировини в технології отримання паливного етанолу проводили з метою визначення впливу на розмір частинок рослинної сировини (пшеничної соломи та кукурудзяних стебел) під час її попередньої обробки для гідролізу в технології отримання паливного етанолу. Обробку суспензії рослинної сировини проводили на експериментальній установці з реактором-змішувачем на базі РПА. Результати даного дослідження наведені в роботі [440] дають можливість підвищити продуктивність обладнання в 1,5–2 рази і знизити енергоспоживання на 25–30 %.

Відомо, що попередня дегазація рідини значно підвищує інтенсивність кавітаційної дії, що відкриває перспективи для подальшої оптимізації технологічних процесів і такий підхід може бути особливо корисним у випадках, де важливе зменшення піноутворення, як, наприклад, при обробці молочної сировини тощо [109, 441].

У межах експериментальних досліджень наведених в цьому розділі процес дегазації рідини не був предметом окремого дослідження, однак процеси кавітаційної дегазації розглядаються в подальших розділах, зокрема наведена в шостому розділі цієї роботи роброблена дослідна установка нейтралізації кислого конденсату базується, зокрема, на принципі кавітаційної дегазації рідини. Це дозволяє припустити, що окремі отримані результати можуть бути частково зумовлені саме попереднім видаленням газів з рідини.

З метою оцінки впливу гідродинамічної обробки на процеси диспергування при отриманні водовугільного палива, на зміну рН, концентрацію іонів кальцію і жорсткість води були проведені експерименти на базі створених лабораторних установок з використанням РПА і пульсаційного диспергатора як кавітаційних реакторів. Отримані результати вказують, що подальші дослідження в напрямку поєднання процесів дегазації та кавітаційної обробки можуть бути доцільними для покращення перебігу технологічних процесів.

3.1. Основні технічні характеристики застосованого РПА як кавітаційного реактора

Для проведення досліджень як кавітаційний реактор було використано РПА спеціальної конструкції типу ротор-статор-ротор для якого передбачена можливість зміни ширини зазорів між роторами і статором шляхом встановлення між роторами статора відповідного розміру та зміни частоти обертання роторів застосовуючи частотний перетворювач (варіатор). Основні технічні характеристики застосованого РПА наведені в табл. 3.1.

Таблиця 3.1. Основні технічні характеристики застосованого РПА

Показники	Позначення	Розмірність	Значення
Радіус I ротора (внутр.)	$R_{rot1\ in}$	мм	65
Радіус I ротора (зовнн.)	$R_{rot1\ ex}$	мм	70
Радіус статора (внутр.)	$R_{st\ in}$	мм	70
Радіус статора (зовнн.)	$R_{st\ ex}$	мм	75
Радіус II ротора (внутр.)	$R_{rot2\ in}$	мм	75
Радіус II ротора (зовнн.)	$R_{rot2\ ex}$	мм	80
Ширина I зазору (ротор-статор)	δ_1	мм	0,5÷0,7
Ширина II зазору (статор-ротор)	δ_2	мм	0,5÷0,7
Кількість прорізів	N_{or}	-	60
Висота прорізів	h	мм	40
Ширина прорізу I ротора	a_{r1}	мм	4,5
Глибина прорізу I ротора	l_{r1}	мм	5
Відстань між прорізами I ротора	b_{r1}	мм	2,5
Ширина прорізу статора	a_{st}	мм	5,1
Глибина прорізу статора	l_{st}	мм	5
Відстань між прорізами статора	b_{st}	мм	2,5
Ширина прорізу II ротора	a_{r2}	мм	5,5
Глибина прорізу II ротора	l_{r2}	мм	5
Відстань між прорізами II ротора	b_{r2}	мм	2,8
Окружність I ротора (внутр.)	$2\pi R_{rot1\ in}$	мм	408
Окружність I ротора (зовнн.)	$2\pi R_{rot1\ ex}$	мм	440
Окружність статора (внутр.)	$2\pi R_{st\ in}$	мм	440
Окружність статора (зовнн.)	$2\pi R_{st\ ex}$	мм	470
Окружність II ротора (внутр.)	$2\pi R_{rot2\ in}$	мм	471
Окружність II ротора (зовнн.)	$2\pi R_{rot2\ ex}$	мм	503
Число обертів роторів	Ω	об/хв	1500÷3600
Кутова швидкість	ω	с ⁻¹	157,0÷376,8

3.2. Дослідження впливу гідродинамічної обробки на диспергування водовугільної суспензії

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 типів водовугільних палив.

Виходом з такої ситуації могло б стати створення універсального водовугільного палива (УВВП), придатного для різних типів енергетичних установок. При цьому, 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. Водовугільне паливо отримують шляхом штучного обводнення дрібнорозмеленого вугілля з вмістом твердої фракції від 45 до 75 % забезпечуючи при цьому його якісні показники згідно вимог для його спалювання в топці котлоагрегата [442]. Також ВВП може бути використане як сировина для отримання гумінових добрив при кавітаційному диспергуванні шляхом впливу потужним ультразвуковим випромінюванням на вугільну суспензію [90].

Основним недоліком будь-якого ВВП є те, що воно придатне для спалювання в певному типі печах, котлах або двигунах, що потребує створення різних за складом та структурою типів ВВП.

Виходом з такої ситуації могло б стати створення універсального водовугільного палива, придатного для різних типів енергетичних установок. При цьому, 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 [443].

3.2.1. Аналіз сучасного стану існуючих способів і обладнання для отримання водовугільного палива

Аналіз останніх досліджень та публікацій показує, що існує багато способів отримання ВВП. Відомий спосіб отримання водовугільного палива [444], що дозволяє отримувати високодемінералізоване екологічно чисте паливо на основі викопного вугілля, яке може бути використане для спалювання в котлах, печах та інших установках об'єктів теплоенергетики при заміні ним газу та мазуту. Спосіб включає дроблення вугілля, його мокре подрібнення з отриманням водовугільної суспензії, ступінчасту демінералізацію подрібненого до крупності 3 мм вугілля для зниження його зольності з утворенням первинного і вторинного продуктів, подальшу їх демінералізацію і зневоднення до вологості 40 %, після чого вводять пластифікатор і стабілізатор та використовують для заміни газу та мазуту.

Основними недоліками відомого способу є дуже складний та багатостадійний технологічний ланцюг отримання водовугільного палива, який може бути реалізований на спеціальних підприємствах при ТЕЦ, які, маючи надлишок теплової енергії, можуть дозволити проведення численних енерговитратних технологічних процесів.

Також відомий спосіб отримання водовугільного палива [445], що дозволяє отримувати високодемінералізоване екологічно чисте паливо на основі викопного вугілля. Спосіб включає дроблення вугілля, його мокре подрібнення, фізико-механічну демінералізацію вугілля для зниження його зольності та гомогенізацію. Дроблення вугілля здійснюють до крупності 3 мм і проводять його фізико-механічну демінералізацію, потім його подрібнюють мокрим способом до крупності 0,2-0,3 мм і проводять його хімічну демінералізацію неорганічною кислотою з отриманням реакційної маси, з якої виділяють низькозольне подрібнене вугілля. До зневодненого до вологості 45 % подрібненого низькозольного вугілля додають воду, аміак та модифікатор реологічних властивостей та гомогенізують дисперсну паливну систему. Такий спосіб дозволяє отримати глибоко демінералізоване екологічно чисте водовугільне паливо.

Основними недоліками цього способу є необхідність проведення фізико-механічної та дорогої хімічної демінералізації вугілля, а також значні теплові втрати при зневодненні демінералізованого вугілля, що може бути рентабельним лише на спеціальних підприємствах при ТЕЦ, що мають надлишок теплової енергії.

Також відомий спосіб отримання водовугільного палива [446], що включає подрібнення вугілля в молотковій дробарці до фракції 0-10 мм, крупний помел отриманої твердої складової в кавітаційному змішувачі з одночасною її демінералізацією, тонкий помел отриманого твердого паливного продукту в кавітаційному змішувачі з водою. У кавітаційний змішувач великого помелу додають 0,005 % лужного реагента, до 3,5 % вуглестабілізуючої добавки та воду з підтриманням пульпи турбіною змішувача у зваженому стані. Отриману суспензію направляють на гідрокласифікатор для відділення вугільних частинок розміром більше 800 мкм і мінеральних частинок, а відокремлені частинки мінералів і вугілля подають в гідроциклон для відділення частинок вугілля і повернення їх у змішувач, а мінералів у відвал. Суспензію після відділення великої фракції вугілля і мінералів направляють в диспергатор тонкого помелу з отриманням частинок твердої фази 0-250 мкм, де ще раз компоненти суспензії піддаються одночасному подрібненню і перемішуванню, з подальшим направленням суміші в ємність для накопичення і зберігання, з якої вона подається до пальників котла.

Основним недоліком даного способу є неможливість використання палива з частинками 250 мкм як універсального, тобто воно не може використовуватися в газових турбінах і двигунах внутрішнього згоряння, тому що гранично допустимий розмір часток на порядок перевищує допустимий граничний розмір – 30 мкм.

Проведений огляд і аналіз способів та обладнання для приготування ВВП свідчить про те, що ні один з них, з різних причин, не дає можливості отримати універсальне водовугільне паливо, яке можна використовувати для спалювання в котлах, печах, різноманітних енергетичних установках, двигунах внутрішнього згоряння тощо.

Для отримання водовугільного палива пропонують також застосовувати електророзрядні процеси і технологію електрогідроудару як джерело високої концентрації енергії для дезінтеграції компонентів та виготовлення водно-вугільної суспензії. Пропонується використання електрогідролітичної установки для отримання вугільної суспензії як компонента в технології отримання водовугільного палива і показано можливість одержання водовугільної суспензії з розмірами частинок менше 250 мкм, що підтверджує можливість її використання як компонента водовугільного палива.

Таким чином подальша робота в напрямку удосконалення існуючих і розроблення нових технологій та тепломасообмінного обладнання для виготовлення універсального водовугільного палива (УВВП) придатного для застосування в різних типах теплоенергетичних установок є актуальним завданням.

Зокрема, для отримання водовугільного палива деякі дослідники пропонують використання кавітаційних механізмів. Одержані результати лабораторних досліджень отримання водовугільної суспензії з використанням гідродинамічного роторного змішувача, дозволили досягти високих кавітаційних ефектів в оброблюваному середовищі. Показано, що кавітаційний метод отримання водовугільного палива покращує його реологічні та седиментаційні властивості, зменшує шкідливі викиди під час горіння та впливає на параметри горіння. Також експериментально досліджено вплив механокавітаційної обробки водовугільних та штучних композиційних рідких палив на основі бурого вугілля та антрациту на гранулометричний склад їх вугільної маси та динамічну в'язкість. Показано, що обробка обох видів палива призводить до значного переподрібнення їх вугільної маси та помітного збільшення в'язкості.

Використовуючи кавітаційні процеси і зсувні напруження як механізми способу дискретно-імпульсного введення енергії в дисперсні системи в Інституті технічної теплофізики НАН України на базі РПА [447] і пульсаційного диспергатора [448] як гідродинамічних кавітаційних реакторів проведені дослідження в напрямку отримання універсального водовугільного палива. Далі розглядаються методики

проведення досліджень по одержанню водовугільних суспензій наьдвох тиапах ГДРК і аналіз результатів дослідження.

3.2.2. Опис експериментальної бази та методики проведення експерименту

Для проведення досліджень в складі лабораторного стенду використовували РПА основні технічні характеристики якого наведені в табл. 3.1.

Схема застосованого РПА наведена на рис. 3.1, а робочі органи – на рис. 3.2.

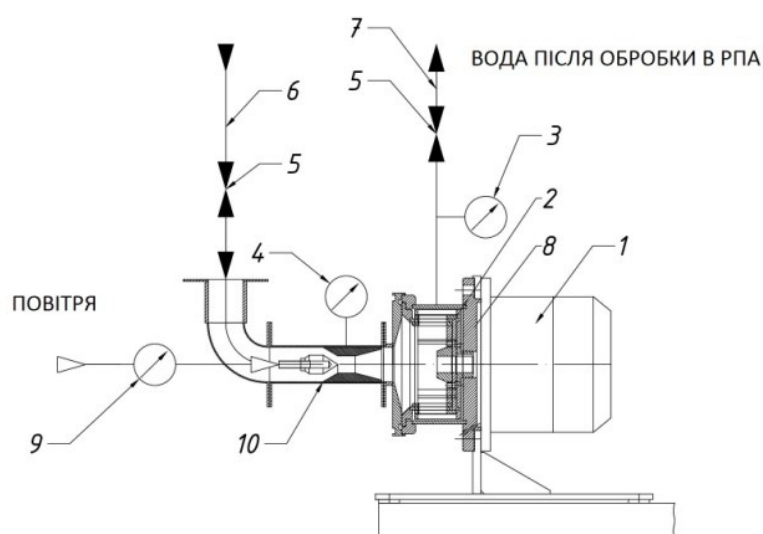


Рис. 3.1. Схема РПА: 1 – електродвигун; 2 – роторно-пульсаційний вузол; 3 – манометр для вимірювання тиску на виході з роторно-пульсаційного вузла; 4 – вакуумметр для вимірювання розрідження у вхідному патрубку; 5 – двоходовий кран; 6 – приймальний трубопровід; 7 – випускний трубопровід; 8 – корпус РПА; 9 – ротаметр; 10 – ежекторний вузол.

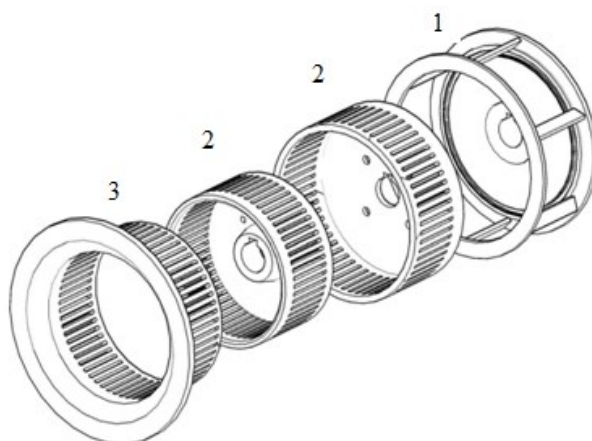


Рис. 3.2. Робочі органи РПА: 1 – робоче колесо відцентрового насоса; 2 – ротори; 3 – статор.

Роторно-пульсаційний вузол апарата при проведенні даного дослідження оснащувався додатково робочим колесом відцентрового насоса (крильчаткою).

Апаратурно-технологічна схема на базі РПА для обробки водовугільної суміші наведена на рис. 3.3.

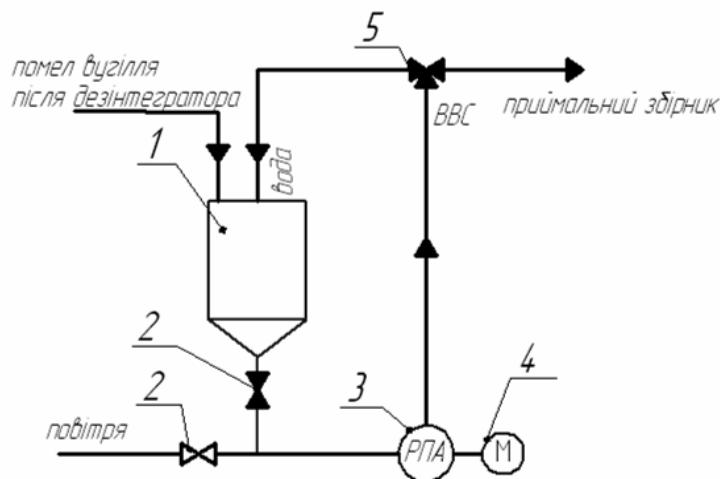


Рис. 3.3. Апаратурно-технологічна схема на базі РПА для обробки водовугільної суміші: 1 – приймальний бункер; 2 – двоходовий кран; 3 – РПА; 4 – електродвигун; 5 – трьохходовий кран.

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. Таким чином, 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 $40 \div 60 \text{ с}^{-1}$ протягом $1 \div 15$ циклів обробки, яку вибрано згідно вимоги, щоб розмір частинок в готовій водовугільній 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 $50 \div 70 \%$.

3.2.3. Результати експериментальних досліджень та їх обговорення

В таблиці 3.2 наведені отримані при дослідженні експериментальні результати, що описують залежність отримуваних розмірів частинок водовугільної суспензії від величини зазору між статором і роторами та кількості циклів обробки в РПА.

Отримані дані свідчать про те, що для досягнення розміру частинок у водовугільній суспензії близько 3 мкм суміш вугілля та води необхідно оброблювати в РПА протягом $8 \div 10$ циклів при зазорі між статором і роторами 500 мкм. Збільшення обробки з 10 до 15 циклів практично не впливає на розмір частинок. Підвищення зазору між статором і роторами до 700 мкм не дозволяє досягнути необхідного розміру частинок (не більше 3 мкм) навіть при обробці за 15 циклів.

Таким чином показано, що обробку водовугільної суміші з вмістом твердої фази 50 % доцільно проводити в РПА з зазором 500 мкм протягом $8 \div 10$ циклів. При цьому отримуємо водовугільну суспензію з максимальним розміром частинок вугілля не більше 3 мкм.

Таблиця 3.2. Залежність розмірів частинок водовугільної суспензії від зазору між статором і роторами та кількості циклів обробки в РПА

Кількість циклів обробки в РПА	Максимальний розмір частинок вугілля, $d_{\max}$ (мкм)		
	Зазор між статором і роторами 700 мкм	Зазор між статором і роторами 600 мкм	Зазор між статором і роторами 500 мкм
0	500	500	500
1	450	435	420
2	430	405	375
3	265	210	160
4	110	90	75
5	55	45	30
6	30	20	15
7	17	13	9
8	14	5	3
9	10	4	3
10	9	3	2
11	9	2	2
12	9	2	2
13	9	2	1
14	9	2	1
15	8	1	1

Подальші дослідження проводили при обробці суміші в РПА з зазором між статором і роторами 500 мкм. При цьому вміст твердої фази в суміші «вугілля-вода» станов 50, 60 і 70 %. Кількість циклів обробки змінювалось від 1 до 15, а швидкість обертання роторів становила 50 с^{-1} . Дані дослідження наведені в таблиці 3.3.

Зі збільшенням вмісту твердої фази в суміші зростає її в'язкість, що сприяє збільшенню енергетично потужних імпульсів, дискретних у часі та просторі, ударних та ультразвукових хвиль, акустичної та гідродинамічної кавітації. Це призводить до інтенсифікації диспергування твердої фази. Тому, при вмісті твердої фази в суміші 70% і зазорі між статором і роторами 500 мкм кількість циклів обробки до досягнення частинок вугілля не більше 3 мкм становить 8 циклів.

Подальша обробка суміші в РПА мало впливає на розмір частинок, збільшуючи при цьому енерговитрати.

Таблиця 3.3. Залежність розмірів частинок водовугільної суспензії від вмісту твердої фази та кількості циклів обробки в РПА

Кількість циклів обробки в РПА	Максимальний розмір частинок вугілля, $d_{\max}$ (мкм)		
	Вміст твердої фази 50 %	Вміст твердої фази 60 %	Вміст твердої фази 70 %
0	500	500	500
1	470	420	365
2	375	320	280
3	160	115	85
4	75	60	50
5	30	20	15
6	15	9	4
7	9	5	4
8	3	3	3
9	3	3	2
10	2	2	1
11	2	2	1
12	2	2	1
13	2	2	1
14	2	1	1
15	1	1	1

Збільшення твердої фази більше 70 % підвищує в'язкість суміші, що ускладнює роботу РПА як відцентрового насоса для її перекачування. Встановлено, що для отримання водовугільної суспензії з розміром частинок не більше 3 мкм обробку суміші вугілля та води в РПА доцільно проводити при вмісті твердої фази 70 % та зазорі між статором і роторами 500 мкм за 8 циклів.

Одним з важливих показників, який впливає на гідродинамічний стан в РПА і, як наслідок, на технологічні властивості водовугільного палива є швидкість обертання роторів (с^{-1}). На рис. 3.4 наведено отриману при проведенні дослідження

залежність розміру частинок водовугільної суспензії від швидкості обертання роторів і кількості циклів обробки. При цьому зазор між статором і роторами становив 500 мкм, а вміст твердої фази 70 %.

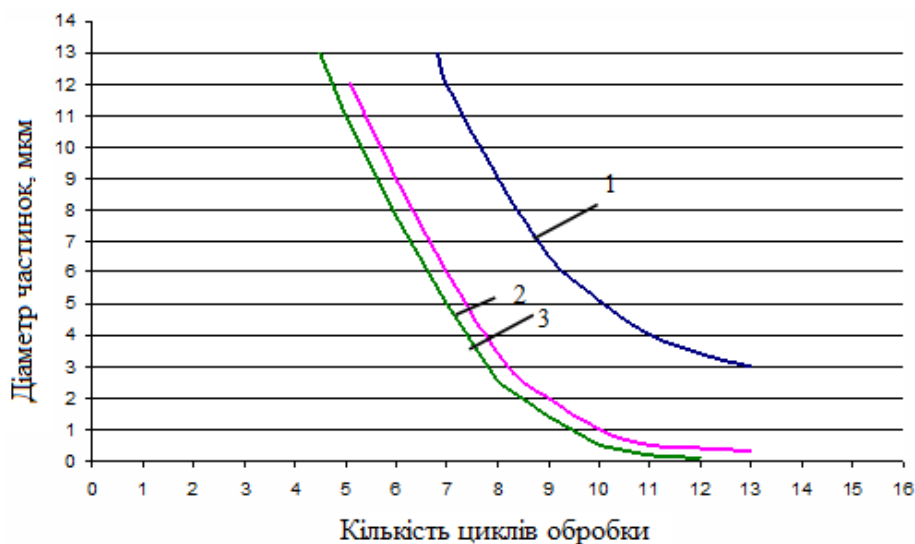


Рис. 3.4. Залежність розмірів частинок водовугільної суспензії від кількості циклів обробки та швидкості обертання роторів: 1 – 40 с⁻¹; 2 – 50 с⁻¹; 3 – 60 с⁻¹.

Зі збільшенням швидкості обертання ротора з 40 с⁻¹ до 60 с⁻¹ кількість циклів обробки для досягнення розміру частинок водовугільної суспензії не більш ніж 3 мкм зменшується. Так, при обробці суспензії зі швидкістю обертання ротора 40 с⁻¹ необхідно 12÷13 циклів для досягнення розміру частинок 3 мкм, при швидкості 50 с⁻¹ – 8 циклів, при 60 с⁻¹ – після 8 циклів обробки розмір частинок становить 2,5 мкм. Таким чином встановлено, що для досягнення розмірів частинок водовугільної суспензії від 1 до 3 мкм необхідно здійснювати обробку суміші в РПА зі швидкістю обертання ротора 50 с⁻¹ протягом 8÷10 циклів.

Для підтвердження ефективності застосування РПА при приготуванні водовугільного палива було проведено порівняльний аналіз діаметра частинок готового продукту, де тонке подрібнення після дезінтегратора проводили в рідкому середовищі в пристрої гідроударної дії та РПА при швидкості обертання ротора 50 с⁻¹, зазором між статором і роторами 500 мкм протягом 8÷10 циклів обробки.

Кількість твердої фази при отриманні водовугільного палива шляхом обробки в РПА та пристрої гідроударної дії становила 70 %. Результати дослідження наведені в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4. Порівняльний аналіз відсоткового співвідношення діаметра частинок водовугільного палива (дисперсний розподіл) в залежності від типу обладнання та технології

Тип обладнання	Діаметр частинок УВВП (мкм)															
	1	1,5	2	3	4	6	8	12	16	24	32	48	64	96	128	192
Пристрій гідроударної дії, %	12,5	4,1	10,6	10,4	7,2	0,7	9,2	9,1	7,4	7,8	8,2	3,9	4,2	4,1	0,0	0,0
РПА, %	5,0	17,9	42,7	35,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Порівняльний аналіз (дисперсний розподіл) показує, що при приготуванні водовугільного палива з застосуванням РПА 100 % частинок мають діаметр не більше 3 мкм, при цьому 41,7 % – не більше 2 мкм.

При використанні пристрою гідроударної дії 100 % частинок мають діаметр не більше 96 мкм тому отриманий продукт не можна назвати універсальним, тому він може бути використаний для спалювання тільки в окремих видах теплоагрегатів.

Висока ефективність приготування водовугільного палива в РПА пояснюється деструкцією молекул вугілля, що розпадається на окремі органічні складові з активною поверхнею частинок та високою кількістю вільних органічних радикалів частинок розміром $1 \div 3$ мкм.

В результаті обробки в РПА вода також зазнає змін – у ній утворюються атомарний водень, перекис водню H_2O_2 тощо. Гідродинамічна кавітаційна обробка в РПА не лише механічно руйнує вугілля, а й змінює хімічний склад поверхневих шарів вугільних частинок за рахунок реакцій окислення-гідролізу у воді. Це спричиняє підвищення стабільності готової водовугільної суспензії, що призводить до зміни динаміки горіння та додаткового зниження викидів NO_x та CO_2 . Такий спосіб отримання ВВП покращує реологічні та седиментаційні властивості палива, знижує шкідливі викиди при горінні і впливає на параметри горіння.

Вплив механізмів ДІВЕ, які реалізуються при приготуванні ВВП в РПА і конструктивних особливостей роторно-статорного вузла призводять до механохімічної деструкції вугільних частинок з розривом хімічних зв'язків та утворенням нових поверхонь розділу фаз. Найбільш ймовірний розрив у бічних ланцюгах макромолекул вугільної речовини з утворенням вільних радикалів, що мають підвищену реакційну здатність, у тому числі по відношенню і до дисперсійного середовища (води). Активний контакт вугільних частинок з водою призводить до гідродинамічної деструкції вугілля.

Встановлено, що для приготування УВВП з розміром частинок не більше ніж 3 мкм вугілля попередньо необхідно диспергувати в дезінтеграторі до розміру частинок 500 мкм. Після цього отриманий помел вугілля в кількості 70 % змішувати з водою в кількості 30 % та обробляти в РПА при швидкості обертання ротора 50 с^{-1} протягом $8 \div 10$ циклів. При цьому зазор між статором і роторами повинен становити 500 мкм. Таким чином отримуємо універсальне водовугільне паливо, яке можна застосовувати для спалювання в котлах, печах, різноманітному теплоенергетичному обладнанні, двигунах внутрішнього згоряння тощо. Проведений огляд та аналіз способів і обладнання свідчить про те, що ні один з них по різних причинах не дає можливості отримати УВВП з розміром частинок не більше 3 мкм крім запропонованого.

3.3. Дослідження впливу гідродинамічної обробки з використанням пульсаційного диспергатора як альтернативи РПА для готування водовугільного палива

Використання РПА як кавітаційного реактора в технологічній схемі отримання універсального водовугільного палива поряд з його високою ефективністю також має певні недоліки: 1) обробка високов'язких суспензій супроводжується великою витратою енергії, нагріванням і високим абразивним зношуванням рухомих поверхонь, що значно скорочує термін експлуатації цих

пристроїв; 2) через сильну механічну дію може відбуватись неконтрольоване надмірне поздрібнення частинок суспензії.

На основі аналізу існуючих кавітаційних технологій створення ВВС запропоновано принципово новий кавітаційний реактор для проведення операції мокрого розмелу вугілля на другій стадії готування тонкодисперсних ВВС, в якому в певній мірі відсутні зазначені вище негативні фактори, властиві різним типам роторних апаратів, які застосовуються зараз в цих технологіях.

3.3.1. Опис експериментальної бази та методики проведення експерименту

В результаті аналізу роботи апаратів мембранного типу зі знакозмінним тиском в ІТТФ НАН України (у відділі ТДС) створено кавітаційний реактор на базі пульсаційного диспергатора для використання в технологічних операціях змішування, диспергування, гомогенізації тощо, зокрема для обробки в'язких суспензій та рослинної сировини. Можливість реалізації в цьому апараті потужних кавітаційних ефектів дозволило значно розширити спектр структурно-механічних властивостей оброблюваних сумішей при суттєвому зменшенні непродуктивних енерговитрат.

Очевидна перевага диспергаторів мембранного типу в тому що вони, на відміну від РПА або апаратів із застосуванням відцентрових насосів, здатні обробляти високоабразивні суміші протягом тривалого часу експлуатації.

Загальна схема запропонованого кавітаційного реактора на базі пульсаційного диспергатора і принцип його роботи практично такі ж, як і в раніше розроблених в ІТТФ НАН України пульсаційних апаратів з активними мембранами [359, 363, 459]. 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 [371, 460–463].

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.

Завдяки широкому спектру своїх можливостей і спроможності ініціювати різноманітних механізми ДІВЕ – від м'яких до дуже жорстких – без суттєвої зміни конструкції, а також завдяки невисокої енергоємності, кавітаційні пульсаційні диспергатори з періодичною зміною тиску мають хороші перспективи застосування в багатьох технологіях.

Для проведення дослідження як кавітаційний реактор було використано апарат з двома активними мембранами оснащений соплом Вентурі. 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 основному, в соплі Вентурі.

На рис. 3.5 наведено принципову схему та загальний вигляд двомембранного кавітаційного пульсаційного диспергатора з соплом Вентурі. Апарат складається з завантажувальної ємності 7 з ВВС, яка знаходиться під атмосферним тиском; робочої камери з еліптичними боковими поверхнями 4; прямої труби 5, що з'єднує камеру 4 з ємністю 7. На ділянці труби 5 вміщено профільоване сопло Вентурі 6. Всередині камери 4 розміщено дві круглі гнучкі мембрани, які розділяють рідинний та газовий тракти апарата за допомогою швидкодіючого електромагнітного клапана 3. Камера 4 у відповідності до заданої програми періодично з'єднується з ресивером низького тиску (РНТ) 1, або з ресивером високого тиску (РВТ) 2. Величина тиску в РВТ підтримується компресором, а величина тиску в РНТ – вакуумним насосом. Принцип роботи апарата полягає в наступному.

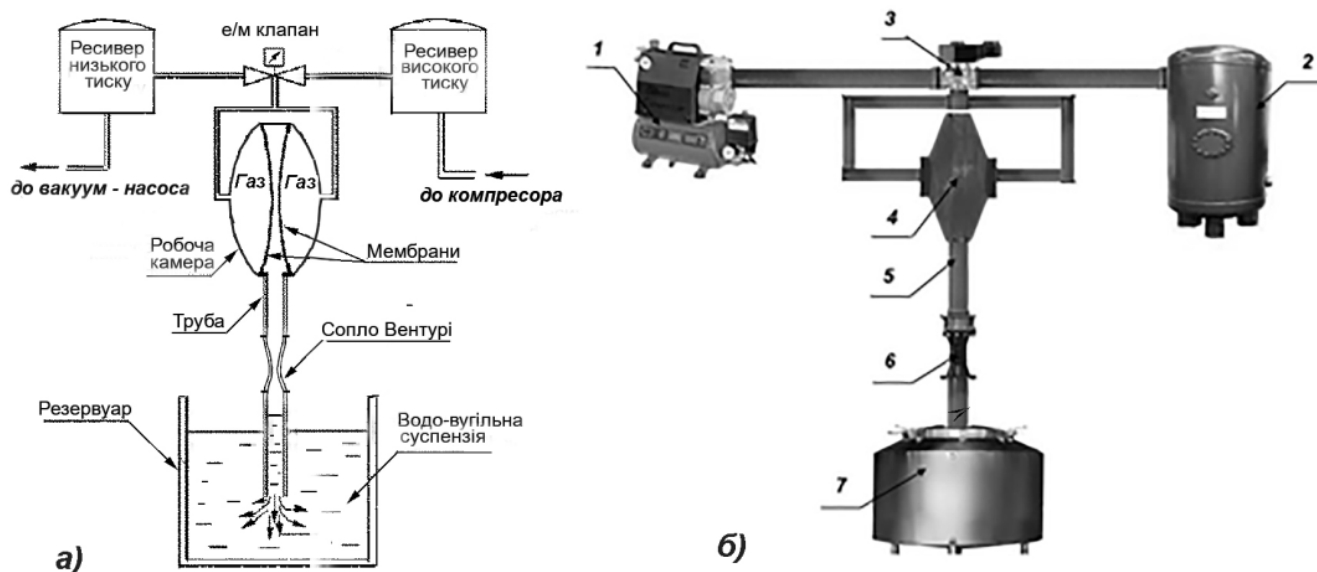


Рис. 3.5. Принципова схема (а) та загальний вигляд (б) кавітаційного пульсаційного диспергатора: 1 – ресивер низького тиску; 2 – ресивер високого тиску; 3 – електромагнітний клапан; 4 – робоча камера з мембранами; 5 – труба; 6 – сопло Вентурі; 7 – завантажувальна ємність з суспензією

В ємність 7 завантажують у заданому співвідношенні суміш попередньо роздрібненого вугілля з водою. На початку роботи рідинна суміш через трубу 5 заповнює увесь об'єм камери 4, так, що мембрани перекривають отвори, що з'єднують камеру з ресиверами. При з'єднанні камери з РВТ суміш під дією мембран виштовхується з камери 4 в ємність 7 через трубу 5 з соплом 6. Внаслідок швидкого інерційного руху вниз по трубі 5 рідина відривається від поверхні мембран з створенням глибокого вакууму над поверхнею стовпа рідини. Різка зміна тиску в об'ємі суміші в трубі прискорює масоперенос екстрагента всередині капілярної структури частинок сировини з можливим руйнуванням дисперсної фази і вилученням компонентів з клітин сировини. В ємності 7 під дією потужного струменя з труби відбувається інтенсивне турбулентне перемішування. Завдяки різниці тиску рідина в трубі швидко гальмується, змінює напрямок руху на зворотній, входить в камеру і притискається до поверхні мембран. На цій стадії камера 4 через клапан підключається до РНТ і мембрани швидко розходяться, перекриваючи отвори до ресиверів. При цьому відбувається різке гальмування

потоків на бокових еліптичних поверхнях камери завдяки чому створюються потужні ефекти гідроудару всередині камери і в трубі. На цій стадії камера знову підключається до РВТ, на чому завершується черговий цикл роботи пульсатора. За період одного циклу в рідинному тракті апарата ініціюється сукупність потужних механізмів, таких як кавітаційні ефекти всередині сопла, гідравлічний удар, дія зсувних напружень та інтенсивна турбулізація суміші.

Дане дослідження проведене з метою експериментальної перевірки та обґрунтування принципової можливості застосування кавітаційного пульсаційного диспергатора для готування тонкодисперсних водовугільних суспензій. В задачу дослідження не входило визначення оптимальних режимів створення ВВС за критеріями дисперсності, в'язкості та седиментаційної стабільності без застосування будь-яких хімічних реагентів-пластифікаторів.

Методика проведення експерименту. 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 попередньо приготовлену грубодисперсну ВВС заливали в кількості 15 л в завантажувальну ємність апарата 7 (рис. 3.5) і проводили обробку суміші при температурі рідини 25 °С. На даному етапі дослідження задача полягала у досягненні заданого ступеня дисперсності ($d \leq 40$ мкм) за можливо короткий час.

При обробці зразка суспензії заданої концентрації c_m початкова стадія полягала у виборі оптимального режиму обробки – величини тиску в РВТ (в інтервалі $p_{РВТ} = 0,3 \div 0,5$ МПа) і, відповідно, тривалості одного циклу роботи апарата (в інтервалі $\Delta\tau_{Ц} = 0,8 \div 1,2$ с) з урахуванням того, що $\Delta\tau_{Ц} = \Delta\tau_{РВТ} + \Delta\tau_{РНТ}$ для кожного визначеного значення $\Delta\tau_{Ц}$ необхідно також визначити оптимальні значення часу підключення камери до РВТ ($\Delta\tau_{РВТ}$) та до РНТ ($\Delta\tau_{РНТ}$). В процесі

обробки величину тиску в РНТ підтримували на рівні $p_{\text{РНТ}} \propto 2$ кПа. 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.

3.3.2. Результати експериментальних досліджень та їх обговорення

Експериментальні дослідження показують, що дисперсний склад суміші змінюється з часом обробки. Криві розподілу за розмірами вугільних частинок в зразках ВВС зображено на рис. 3.6.

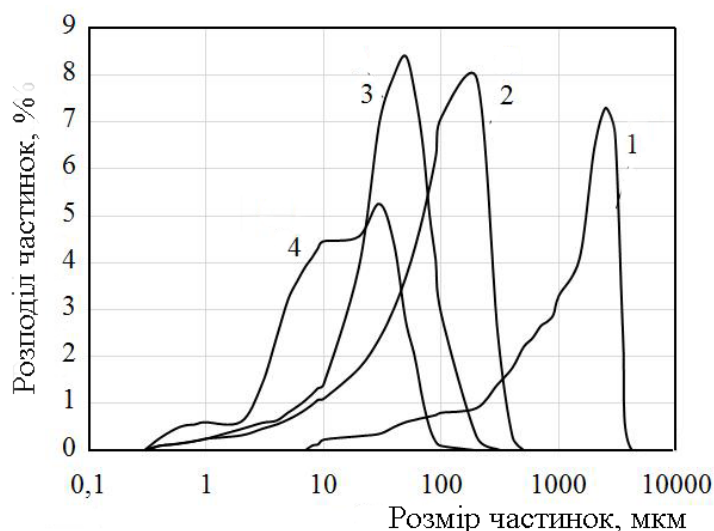


Рис. 3.6. Диференційні криві розподілу за розмірами вугільних частинок ВВС в залежності від часу обробки: 1 – вихідний зразок; 2 – 10 хв обробки; 3 – 20 хв обробки; 4 – 30 хв обробки.

Так, обробка в кавітаційному диспергаторі протягом 20 хв дозволяє отримувати фракційний склад палива, що відповідає вимогам використання як для ТЕС так і для котельних. Обробка протягом 30 хв вже дозволяє досягти необхідних показників для ТЕЦ. Тобто, в залежності від вимог до дисперсного складу суспензії можна використовувати різну тривалість обробки.

Результати вимірювання рН ВВС з концентрацією $c_m = 56\%$ в залежності від часу обробки представлено на рис. 3.7.

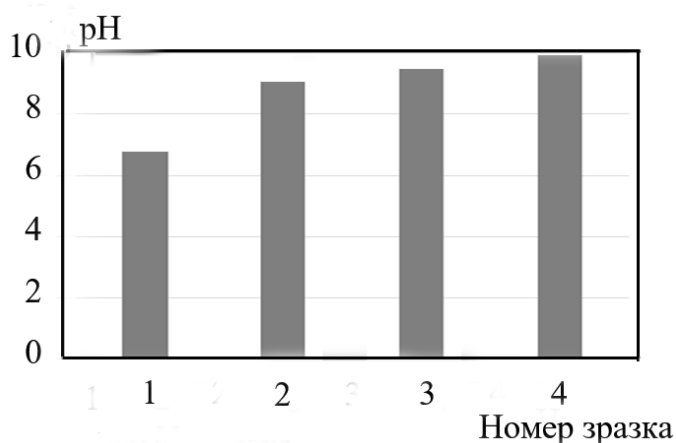


Рис. 3.7. Зміна величини рН ВВС з концентрацією $c_m = 56\%$ в залежності від часу кавітаційної обробки:

1 – вихідний зразок; 2 – 10 хв обробки; 3 – 20 хв обробки; 4 – 30 хв обробки.

Найбільш інтенсивне збільшення рН – на 2,3 одиниці спостерігали після 10 хв обробки. Подальша обробка також призводить до підвищення рН, однак воно було менш вираженим і склало приблизно 0,5 одиниці наступні 20 хв та 30 хв обробки. Підвищення рН середовища в умовах кавітаційної обробки також спостерігали інші дослідники, які пояснюють це утворенням вільних іонів та радикалів. В цьому діапазоні рН відбувається виділення гумінових кислот. Такі сполуки володіють вираженими поверхнево-активними властивостями і забезпечують стійкість 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 c_m 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. 3.8 показують стабільність ВВС протягом 5-6 діб. Зниження висоти шару дисперсної фази свідчить про дестабілізацію дисперсної системи, що приводить до поступового осадження і згущення вугільних частинок. При підвищенні масової концентрації дисперсної фази з 55 до 65%, умовна в'язкість і міцність дисперсної системи зростає внаслідок збільшення числа контактів між частинками в одиниці об'єму.

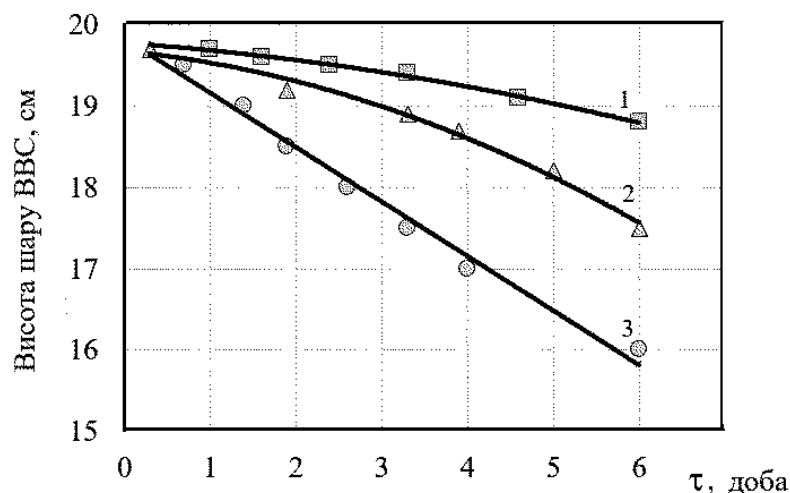


Рис. 3.8. Зміна з часом висоти шару дисперсної фази ВВС в процесі седиментації при різних концентраціях суспензії c_m : 1 – 56%; 2 – 69; 3 – 65%

Для кожної проби ВВС з концентраціями $c_m = 56\%$, 60% та 65% при різних термінах обробки визначалися динамічна та умовна в'язкості. На рис. 3.9 показано залежність динамічної в'язкості ВВС від масової концентрації вугілля. З аналізу графічних кривих можна дійти висновку, що з ростом дисперсності твердої фази в'язкість суспензії різко зростає з підвищенням концентрації суспензії і зменшується з часом кавітаційної обробки, що відповідає даним інших дослідників.

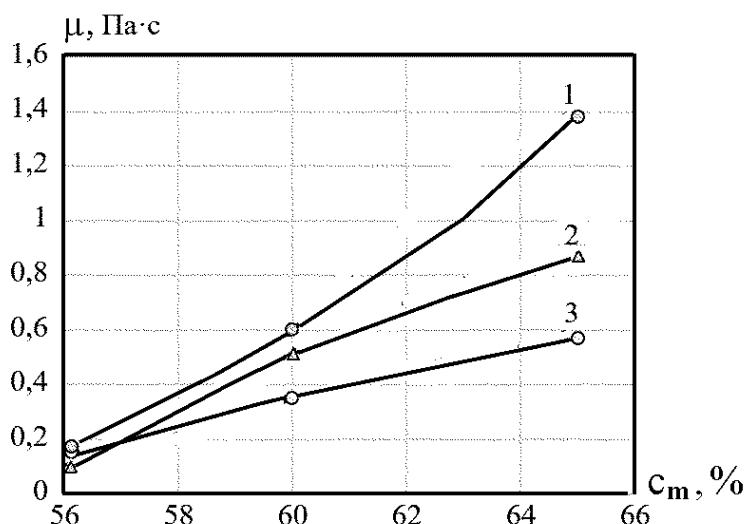


Рис. 3.9. Залежність динамічної в'язкості від масової концентрації дисперсної фази: 1 – після 30 хв обробки; 2 – після 20 хв обробки; 3 – після 10 хв обробки.

Найбільша динамічна в'язкість спостерігається в зразку з концентрацією 65% після 30-ти хвилинної обробки і досягла 1,38 Па·с. 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%.

Запропонований в даному дослідженні 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. Використовуючи механізми гідродинамічної кавітації, можливо отримати достатньо рівномірний розподіл частинок вугілля за розмірами, що відповідає нормативним вимогам підприємств теплоенергетики, впливати на реологічні та структурно-механічні властивості суспензії. Також, особливе місце займає вплив кавітації на дисперсійне середовище, що може суттєво або зовсім скоротити необхідність додавання поверхнево-активних домішок до суспензії, та обумовлює якість і собівартість продукту. Такий ефект в комплексі з отриманням

необхідної дисперсності частинок забезпечують седиментаційну стійкість ВВС, яка зберігається протягом 5-6 діб без застосування хімічних домішок. Підтримання седиментаційної стійкості суспензії протягом більш тривалого часу можливе також з застосуванням хімічних домішок або періодичною короткотривалою рециркуляцією ВВС з інтервалом 2-3 доби.

3.4. Дослідження впливу гідродинамічної обробки на зміну рН, концентрацію іонів кальцію і жорсткість води

Зниження жорсткості води є актуальною проблемою як для муніципальних систем водопостачання так і для промислових підприємств та теплових станцій. Особливо відчутною дана проблема є там, де для господарсько-питного водопостачання використовують підземні та ґрунтові води з високим показником жорсткості, зумовленим наявністю в них мінеральних домішок, зокрема гідрокарбонатів кальцію і магнію. При нагріванні такої води іони кальцію і магнію, що зумовлюють жорсткість води, утворюють малорозчинні сполуки. Ці сполуки відкладаються на поверхнях теплообмінних апаратів, теплоенергетичних установок, трубопроводів, що призводить до зниження ефективності їх роботи, перевитрати палива, частих зупинок для очищення тощо. Дослідження в даному напрямку проводились багатьма науковцями і дозволили вирішити проблему вилучення з води солей жорсткості, проте досі актуальною є проблема пошуку оптимальних способів її реалізації, спрямованих на зниження енергетичних витрат та інтенсифікацію перебігу процесу пом'якшення води. Зокрема, очищення котлової води здійснюється для мінімізації корозії, відкладень, накипу та переносу в контурах водяної пари. Враховуючи вищевикладене, можна зробити висновок, що видалення гідрокарбонату кальцію та зменшення жорсткості води залишається нагальною потребою не лише в галузі теплоенергетики, а також для підготовки підземних вод для споживання населенням і технологічних потреб.

3.4.1. Аналіз сучасного стану проблеми видалення з води гідрокарбонату кальцію та зниження загальної жорсткості води

Для зниження жорсткості води використовують методи термічної, реагентної, мембранної, електрохімічної і магнітної обробки, іонний обмін, а також їх поєднання.

Зокрема, в роботі [449] проаналізовано класичні методи пом'якшення води (хімічний, інгібітори осадження, електрохімічна обробка, іонообмін і мембранне розділення). Основним недоліком цих методів є зміна складу води або утворення відходів, тому ці процеси продовжують удосконалюватись за допомогою нових матеріалів і використання більш екологічних та менш забруднюючих речовин.

Як альтернатива, наводяться магнітні та електромагнітні методи, перевагою яких є неінвазивність, відносна дешевизна і відсутність потреби додавання хімічних речовин у воду. Однак їх ефективність чітко не продемонстрована, так як залежить від температури, тиску, вмісту розчиненого діоксиду вуглецю, рН, інтенсивності поля, потоку води тощо. Крім цього, отриманий ефект є тимчасовим.

Розглянуто можливість заміни процесу іонного обміну на зворотний осмос задля зниження кількості стоків, однак це призводить до підвищення вартості обробки, оскільки залишаються енерговитратні стадії попередньої обробки – декарбонізація та фільтрація [450]. У дослідженні [451] для інтенсифікації процесу зниження вмісту солей жорсткості у воді застосовували ізольовані ультразвукові коливання для обробки живильної води для водотрубного парового котла з тиском 20 бар, однак застосування ультразвукових технологій може бути економічно оправданим лише при невисокій продуктивності обладнання.

Перелічені методи хоч і набули широкого поширення, але мають ряд недоліків, пов'язаних з великою витратою реагентів, необхідністю попередньої підготовки води, обробкою стічних вод і складністю з їх скиданням. Це призводить до пошуку нових технологічних рішень для інтенсифікації процесу зниження жорсткості води. Наразі розвиваються комбіновані технології водопідготовки, що поєднують як вже існуючі процеси так і нові технологічні розробки, зокрема [452].

Для зниження жорсткості води запропоновано застосувати механізми принципу ДІВЕ, зокрема кавітацію і напруження зсуву [453]. Цей метод застосовано в технологіях підготовки питної та технологічної води а також очищення стоків. Зокрема, в роботі [454] розглядали вплив технологічних параметрів обробки води в РПА на абсорбцію кисню, проте технологічні процеси, в основі яких лежить процес окислення, авторами в роботі не розглядались. Ефективність застосування аератора на базі РПА було розглянуто авторами в роботі [455] шляхом порівняння з традиційними аераторами. Проблема нейтралізації кислого конденсату комунальних і промислових котельнях для повторного їх використання розглядалась в роботі [456] де принцип ДІВЕ застосовували для видалення бульбашок вуглекислого газу з кислого конденсату. Проте для етапу пом'якшення води, а саме видалення гідрокарбонату кальцію, механізми принципу ДІВЕ ще не застосовували. Враховуючи вищевикладене, застосування механізмів принципу ДІВЕ для зниження жорсткості води повинно створити умови для інтенсифікації процесу вилучення гідрокарбонату кальцію при нижчих енергозатратах на перебіг процесу і отримання стійкого в часі ефекту після обробки. Це дозволить знизити вартість водопідготовки і підвищити продуктивність процесу пом'якшення води.

3.4.2. Опис експериментальної бази та методики проведення експерименту

Дослідження проводили з метою підвищення ефективності видалення гідрокарбонату кальцію і зменшення жорсткості води за рахунок застосування механізмів принципу ДІВЕ. Це дасть можливість вдосконалити технологію очищення води для муніципальних систем водопостачання, промислових підприємств та теплових станцій.

Для досягнення поставленої мети були поставлені наступні задачі:

- визначити вплив швидкості зсуву потоку та кількості циклів обробки в РПА на рН води і концентрацію іонів кальцію;

- визначити вплив концентрації аміаку та кількості циклів обробки в РПА на величину рН водного розчину при постійній швидкості зсуву потоку;
- визначити вплив концентрації гідроксиду амонію та швидкості зсуву потоку на концентрацію іонів кальцію у воді;
- визначити вплив концентрації гідроксиду амонію у воді та кількості циклів обробки в РПА на загальну жорсткість води;
- визначити вплив концентрації гідроксиду амонію та швидкості зсуву потоку рідини на загальну жорсткість води.

Об'єктом досліджень була вода з артезіанської свердловини, яку піддавали обробці в розробленій дослідно-промисловій аераційно-окислювальній установці роторного типу ініціюючи ефекти принципу ДІВЕ використовуючи РПА, що входить до складу даної установки.

Вода, яку піддавали обробці, мала наступні фізико-хімічні показники: рН – 7,2, концентрація іонів кальцію – 77,1 мг/дм³, загальна жорсткість – 1,20 ммоль/дм³.

Для визначення хімічного складу води застосовували методику ДСанПіН 2.2.4-171-10 « Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною ». Вимірювання рН водних розчинів проводили рН – метром « Експерт-рН», визначення загальної жорсткості здійснювали методом трилонометричного титрування згідно ДСТУ 7525:2014 «Вода питна. Вимоги та методи контролювання якості», концентрацію іонів кальцію визначали методом трилонометричного титрування згідно вимог ДСТУ ISO 6058-2003 «Якість води. Визначання кальцію. Титрометричний метод із застосуванням етилендіамінтетраоцтової кислоти».

Очищення води від гідрокарбонату кальцію проводили на аераційній окислювальній установці роторного типу (рис. 3.10), що містить в своєму складі РПА технічні характеристики якого наведені в табл. 3.1.

Установка складається з наступних блоків: реактора, РПА, контуру рециркуляції, теплообмінного контуру, блоку управління і контролю, вимірювальної апаратури, фільтраційної колони.

Реактор є резервуаром з корисним об'ємом 60 л і призначений для проведення процесу обробки рідини. Для уникнення нагрівання рідини внаслідок дисипації енергії при циркуляції води крізь РПА, корпус реактора обладнано теплообмінним контуром за допомогою якого підтримували задану температуру рідини. У верхню частину реактора вмонтований патрубок для приєднання рециркуляційного трубопроводу. У кришці реактора передбачені технологічні патрубки для подачі рідини в робочий об'єм. У донній частини реактора передбачена заслінка для зміни величини об'ємної витрати.

Блок управління і контролю призначений для управління, контролю і регулювання роботи електрообладнання. Блок складається з магнітного пускача, перетворювача частоти, амперметра і лічильника електроенергії.

Фільтраційна колона є скляною трубою, що заповнюється фільтруючим матеріалом (кульками пінополістиролу, активованим вугіллям, кварцовим піском тощо) і призначена для окислення і видалення осаду.

Дослідно-промислова установка 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» потрібну кількість разів, після чого надходить до збірника готової продукції.

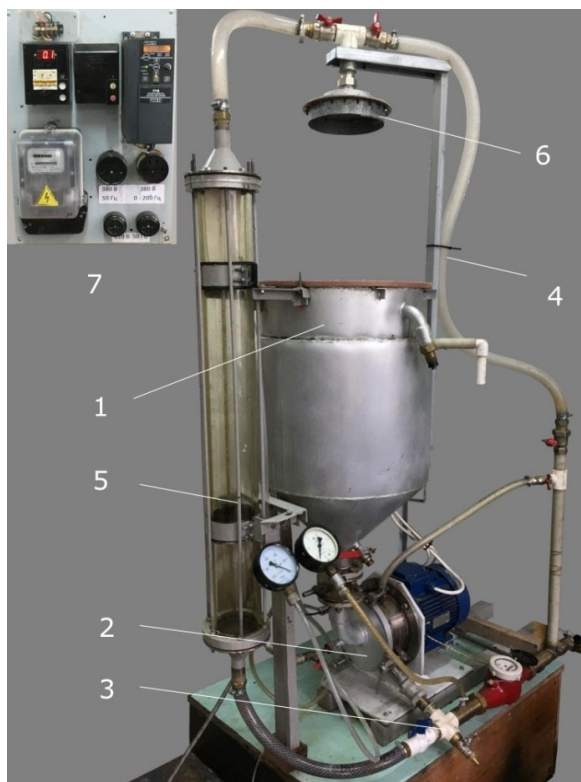


Рис. 3.10. Аераційно-окислювальна установка роторного типу: 1 – реактор; 2 – РПА; 3 – триходовий кран; 4 – контур рециркуляції; 5 – фільтраційна колона; 6 – розпилювальна головка; 7 – блок управління і контролю.

При рециркуляції рідина надходить назад в реактор, проходячи через розпилювальну головку 6. Параметри процесу встановлюються через блок управління і контролю 7.

3.4.3. Результати експериментальних досліджень та їх обговорення

Вплив швидкості зсуву потоку та кількості циклів обробки в РПА на рН води і концентрацію іонів кальцію. Очищення води проводили при температурі 20 °С протягом 1÷20 циклів обробки і швидкості зсуву потоку $(20\div40)\cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$, яку змінювали шляхом зміни обертів роторів при постійній ширині зазору між роторами і статором 0,6 мм.

Швидкість зсуву потоку визначали за формулою:

$$\gamma = \frac{\omega \cdot R}{\delta}, \quad (3.1)$$

де ω – кутова швидкість обертання ротора, с^{-1} ; R – радіус від центру вала електродвигуна до внутрішньої поверхні ротора, м; δ – зазор між статором та ротором, м.

За один цикл обробки приймали час, за котрий весь об'єм води, що обробляється, пройде крізь РПА.

При проведенні досліджень контролювали у воді зміну концентрації іонів кальцію та рН. На рис. 3.11 наведено залежність зміни рН води від кількості циклів обробки та швидкості зсуву, що діє на потік рідини. В табл. 3.5 показано зміну концентрації іонів кальцію (з початковою концентрацією $71,1 \text{ мг/дм}^3$) від кількості циклів обробки і швидкості зсуву, що діє на потік рідини.

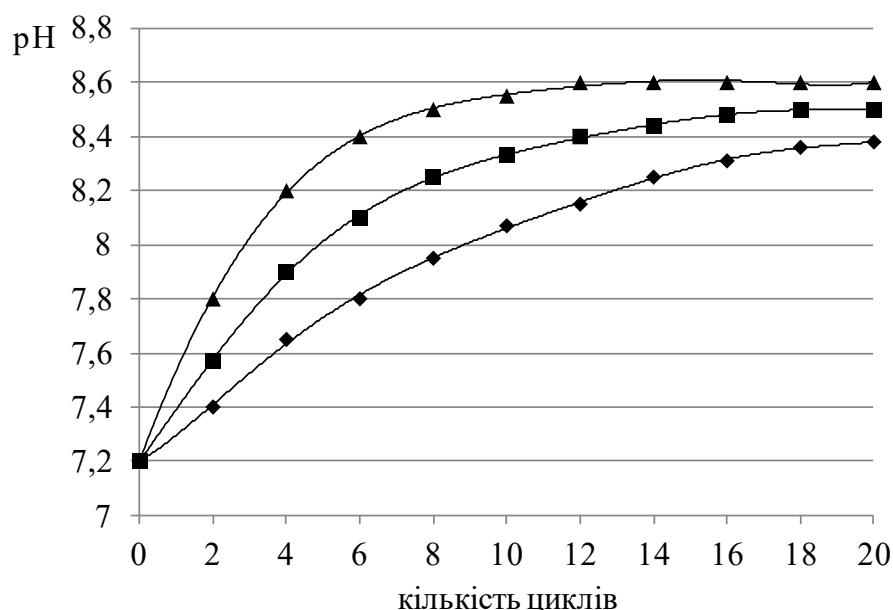


Рис. 3.11. Залежність зміни рН води від кількості циклів обробки і швидкості зсуву потоку: $\blacklozenge$ – 20; $\blacksquare$ – 30; $\blacktriangle$ – 40 (10^3 с^{-1}).

Найбільш суттєве підвищення рН спостерігалось при обробці води зі швидкістю зсуву потоку $40 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$ протягом 11–12 циклів обробки. При подальшій обробці води рН практично не змінювався.

В табл. 3.5 наведено зміну концентрації іонів кальцію (з початковою концентрацією 71,1 мг/дм³) від кількості циклів обробки і швидкості зсуву потоку рідини.

Таблиця 3.5. Зміна концентрації іонів кальцію (мг/дм³) від кількості циклів обробки і швидкості зсуву потоку рідини γ (10³ с⁻¹)

Кількість циклів обробки	Концентрація іонів кальцію, мг/дм ³		
	$\gamma = 20 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$	$\gamma = 30 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$	$\gamma = 40 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$
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

Отримані результати показують, що обробка води в РПА дозволяє знизити вміст іонів кальцію на 28–30 %.

Вплив концентрації аміаку та кількості циклів обробки на рН при постійній швидкості зсуву потоку. Проведено дослідження по підлучуванню вихідної води водним розчином аміаку в кількості 0,005–0,015 мас% з подальшою обробкою суміші в РПА зі швидкістю зсуву потоку $40 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$ протягом 20 циклів обробки. Отримані результати наведені на рис. 3.12.

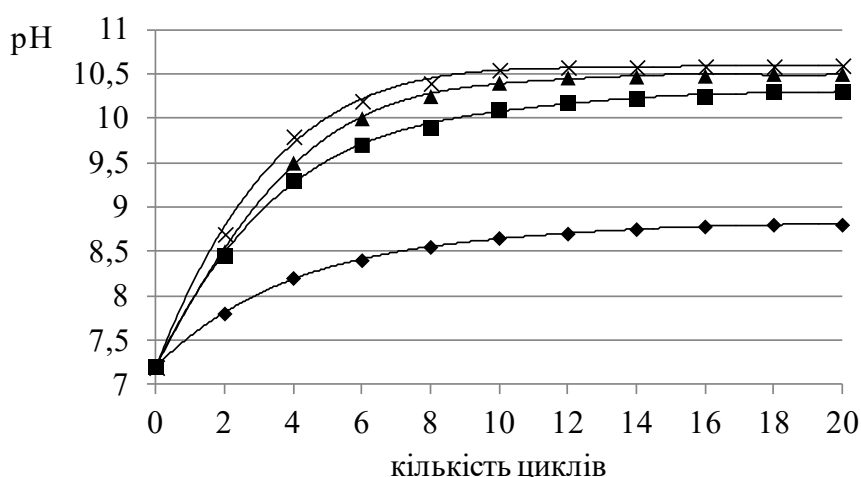


Рис. 3.12. Залежність зміни рН водного розчину від концентрації аміаку (♦ – 0,00; ■ – 0,05; ▲ – 0,1; × – 0,15 (мас %)) та кількості циклів обробки за швидкості зсуву потоку – $40 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$

Зі збільшенням концентрації аміаку у воді від 0,05 до 0,15 мас% значення рН збільшується до максимального протягом перших 10–12 циклів обробки для всіх значень концентрації аміаку.

Вплив концентрації гідроксиду амонію та швидкості зсуву потоку на концентрацію іонів кальцію у воді. В табл. 3.6 наведені експериментальні дані зміни кількості іонів кальцію (мг/дм³) від концентрації у воді гідроксиду амонію та швидкості зсуву, що діє на потік рідини при обробці в РПА.

Таблиця 3.6. Залежність зміни концентрації іонів кальцію (мг/дм³) від концентрації у воді гідроксиду амонію та швидкості зсуву, що діє на потік рідини при обробці в РПА (γ)

Вміст гідроксиду амонію в розчині, мас%	Концентрація іонів кальцію, мг/дм ³			
	0	$\gamma=20 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$	$\gamma=30 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$	$\gamma=40 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$
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

Зі збільшенням вмісту гідроксиду амонію в розчині від 0 до 0,15 мг/дм³ без обробки концентрація іонів кальцію знижується на 64 %. Зі збільшенням швидкості зсуву потоку $(20, 30, 40) \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$ концентрація іонів кальцію зменшується на 98,5; 98,3; 99,3 % відповідно.

Вплив концентрації гідроксиду амонію у воді та кількості циклів обробки в РПА на загальну жорсткість води. На рис. 3.13 наведено залежність зміни загальної жорсткості води від вмісту гідроксиду амонію та кількості циклів обробки в роторно-пульсаційному апараті при постійній швидкості зсуву. Вихідна жорсткість води становила 1,20 ммоль/дм³.

Отримані результати свідчать, що зниження жорсткості води до значення менше 0,02 ммоль/дм³ спостерігається при концентрації гідроксиду амонію 0,1–0,15 % мас. після 9–10 циклів обробки.

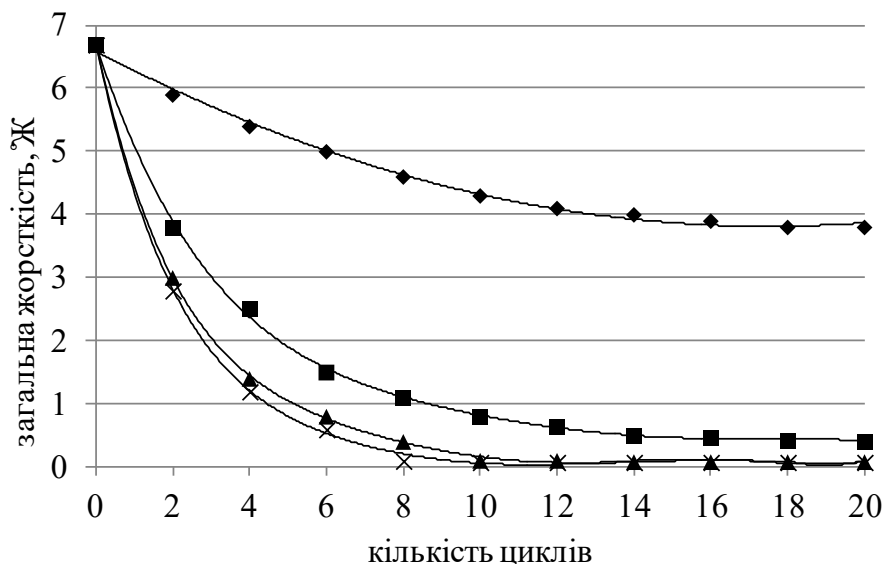


Рис. 3.13. Залежність зміни загальної жорсткості води від вмісту гідроксиду амонію в розчині (♦ – 0,00; ■ – 0,05; ▲ – 0,1; × – 0,15 (% мас)) та кількості циклів обробки в РПА (швидкість зсуву потоку $40 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$)

Вміст гідроксиду амонію в кількості 0,05 %мас дозволяє знизити жорсткість води до 0,07 ммоль/дм³ після 10–12 циклів обробки. Без додавання гідроксиду амонію жорсткість води після 10–11 циклів обробки знижується до 0,68 ммоль/дм³.

Вплив концентрації гідроксиду амонію та швидкості зсуву потоку рідини на загальну жорсткість води. В табл. 3.7 наведені результати вимірювання загальної жорсткості води залежно від вмісту в ній гідроксиду амонію та швидкості зсуву потоку після обробки в РПА.

Згідно даних таблиці 3.7 досягнення показника загальної жорсткості води нижче 0,02 ммоль/дм³ спостерігається при концентрації гідроксиду амонію в розчині вище 0,1 мас% і швидкості зсуву потоку вище $30 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$.

Таблиця 3.7. Залежність зниження загальної жорсткості води (°Ж) від вмісту в ній гідроксиду амонію та швидкості зсуву потоку (γ) після обробки в РПА

Вміст гідроксиду амонію в розчині, мас%	Загальна жорсткість води, ммоль/дм ³			
	0	$\gamma=20 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$	$\gamma=30 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$	$\gamma=40 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$
0	1,20	0,98	0,84	0,68
0,05	0,54	0,34	0,14	0,07
0,1	0,41	0,14	0,02	0,01
0,15	0,39	0,03	0,02	0,01

Обговорення результатів дослідження впливу параметрів обробки на рН, концентрацію іонів кальцію і жорсткість води. Зміна рН води, наведена на рис. 3.11 зумовлена тим, що при проходженні води крізь робочі органи РПА відбувається видалення абсорбованого діоксиду вуглецю, розрив водневих зв'язків окремих молекул води та утворення водяної пари. Відомо, що карбонати, гідрокарбонати та вільний діоксид вуглецю є формами існування вугільної кислоти, їх кількісні співвідношення визначаються величиною рН розчину незалежно від концентрації гідрокарбонатів. Починаючи зі значень рН вище 8,0 відбувається утворення карбонат-іонів, що забезпечує можливість формування твердої фази карбонату кальцію. Найбільш ефективно зниження іонів кальцію відбувалось при обробці води зі швидкістю потоку $40 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$ протягом 15 циклів обробки. Початкова концентрація становила 77,1 мг/дм³, а після обробки – 57,1 мг/дм³ (табл. 3.5).

Максимальне підвищення рН від початкового 7,2 до кінцевого 8,6 спостерігалось при обробці води зі швидкістю зсуву потоку $40 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$ протягом 11–12 циклів обробки. При подальшій обробці води досліджувані показники практично не змінювались, що пов'язано з максимально можливою декарбонізацією води при даних режимах ведення процесу. Таким чином, обробка води в РПА дозволяє знизити вміст іонів кальцію на 28–30 % проте цього недостатньо для використання такої води в теплоенергетиці тому запропоновано застосувати водний розчин аміаку для підвищення ефективності перебігу процесу.

Відомий спосіб пом'якшення води, який полягає в тому, що для більш глибокого видалення іонів кальцію після механічної активації додають водний розчин аміаку в кількості 0,003–0,05 мас%, що дозволяє досягти ступеня пом'якшення води до 93 % [458]. Також пом'якшення води від солей жорсткості досягають її підлужуванням водним розчином аміаку в кількості 0,072 мас%, підігріванням до 40 °С з подальшим перемішуванням в інтервалі швидкостей від 1650 до 17000 об/с протягом 45 с. Це дає можливість знизити значення показника жорсткості від 1,12 до 0,31 ммоль/дм³ [459].

В рамках даного дослідження проведено обробку попередньо підлуженої води водним розчином аміаку в кількості 0,005–0,015 мас% в РПА зі швидкістю зсуву потоку $(20-40) \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$ протягом 20 циклів обробки. Встановлено, що зі збільшенням концентрації аміаку у воді від 0,05 до 0,15 мас% значення рН збільшується максимум до 10,6 і це збільшення відбувається протягом перших 10–12 циклів обробки для будь-яких концентрацій (рис. 3.12). Тому при подальших дослідженнях обробку водного розчину аміаку доцільно проводити в РПА протягом 10 циклів.

Також проводили дослідження впливу параметрів обробки на зміну концентрації іонів кальцію у воді (табл. 3.6). Зниження концентрації іонів кальцію у воді пояснюється тим, що певна кількість кальцію переходить в нерозчинну форму.

Отримані результати обробки попередньо підлуженої води водним розчином аміаку, що наведені на рис. 3.12 порівнюючи їх з рис. 3.11 показують приблизно однакову закономірність зміни рН від кількості циклів обробки при вищих значення рН води.

Зі збільшенням вмісту гідроксиду амонію в оброблюваній воді від 0 до 0,15 мг/дм³ без обробки в РПА концентрація іонів кальцію знижується на 64 % (табл. 3.6), проте при швидкостях зсуву потоку $(20, 30, 40) \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$ концентрація іонів кальцію знижується на 98,5; 98,3; 99,3 % відповідно.

Досліджено зміну загальної жорсткості води (ммоль/дм³) в залежності від концентрації в розчині гідроксиду амонію і кількості циклів обробки при постійній швидкості зсуву потоку в РПА $40 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$ (рис. 3.13). Визначено, що зниження

жорсткості води до значення менше 0,02 ммоль/дм³ спостерігається при вмісті гідроксиду амонію концентрацією 0,1–0,15 % мас. після 9–10 циклів обробки. Вміст гідроксиду амонію концентрацією 0,05 %мас дозволяє знизити жорсткість води до 0,07 ммоль/дм³ після 10–12 циклів обробки. Без додавання гідроксиду амонію жорсткість води після 10–11 циклів обробки знижується до 0,68 ммоль/дм³.

Встановлено, що незалежно від концентрації гідроксиду амонію в розчині жорсткість води максимально знижується на 10 циклі обробки, тому подальша обробка в РПА є недоцільною так як призводить лише до неефективних енерговитрат.

Дані в табл. 3.7 підтверджують результати наведені на рис. 3.13 в тому, що оптимальний вміст гідроксиду амонію в розчині становить 0,1 мас%, а швидкість зсуву в потоці рідини, що обробляється в РПА дорівнює $40 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$. За таких умов обробки загальна жорсткість води знижується до показника 0,01 ммоль/дм³. Це узгоджується з загальноприйнятими вимогами щодо якості води для водогрійних котлів згідно яких жорсткість води не повинна перевищувати 0,01-0,02 ммоль/дм³.

У порівнянні з відомими методами [458, 459] застосування РПА дозволяє підвищити продуктивність процесу пом'якшення води та інтенсифікувати його при відносно низьких питомих енергетичних витратах. Це пояснюється тим, що при обробці в РПА утворюється водоповітряна суміш. Проходячи через робочі органи роторно-пульсаційного вузла, зазнає впливу ударних хвиль, міжфазної турбулентності, мікрокавітації та вихорів, що призводить до інтенсивного дроблення бульбашок повітря, дисперсних частинок та збільшення площі поверхні контакту фаз.

Завдяки цьому збільшується швидкість масоперенесення кисню з газової фази в рідину і його транспортування рідиною. Одночасно відбувається і зміна структури води з утворенням вільних водневих зв'язків, що зумовлює її підвищену активність та реагентну спроможність. Це дає можливість збільшити швидкість хімічних реакцій та технологічних процесів.

Обмеження даного дослідження полягають в тому, що при застосуванні отриманих результатів на практиці чи подальших теоретичних дослідженнях слід враховувати, що перебіг процесу пом'якшення води визначається конструктивними особливостями РПА і початковими фізико-хімічними параметрами води.

Також слід врахувати те, що отримані результати є адекватними при наведених технологічних параметрах ведення процесу. При потребі використання іншої конструкції РПА чи зміни продуктивності установки потрібно провести додаткове дослідження при цих умовах, оскільки даний процес в РПА перебігає під впливом багатьох факторів і складно піддається теоретичним розрахункам.

Розвиток даного дослідження полягає в тому, що обробка води за принципом ДІВЕ в РПА може знайти застосування при реалізації низки хімічних методів пом'якшення води для зменшення витрати реагентів та підвищення ступеня її очищення. При цьому можуть виникнути труднощі з розрахунками, пов'язаними з вибором РПА, оскільки ще не існує єдиної методики розрахунку таких апаратів, бо потрібно враховувати окремі умови перебігу процесу.

3.5. Висновки до розділу 3

1. На базі проведеного огляду, аналізу способів і обладнання для отримання водовугільних суспензій встановлено, що ні один з них з різних причин не дає можливості отримати водовугільну суспензію з розміром частинок до 3 мкм, що є необхідною умовою для отримання універсального водовугільного палива.

2. Визначено режимні параметри роботи обладнання для приготування універсального водовугільного палива. 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 с^{-1} протягом $8 \div 10$ циклів. При цьому зазор між статором і роторами повинен становити 0,5 мм.

3. Проведено дослідження впливу гідродинамічної обробки з використанням модифікованого пульсаційного диспергатора як альтернативи РПА для готування водовугільного палива. Цей тип гідродинамічного кавітаційного реактора більш стійкий до абразивному впливу з боку жорстких водовугільних суспензій ніж РПА і, відповідно, відрізняється більш тривалим терміном експлуатації. Визначено вплив тривалості обробки на дисперсний склад суспензії. Встановлено, що обробка в кавітаційному диспергаторі протягом 20 хв. дозволяє отримувати фракційний склад палива, що відповідає вимогам використання як для ТЕС так і для котельних, а обробка протягом 30 хв. – для ТЕЦ.

4. Попри те, що запропонований спосіб знаходиться на початковому етапі розробки, лабораторні дослідження показали його перспективність. Вплив кавітації на дисперсійне середовище створює можливість суттєвого або повного скорочення додавання поверхнево-активних домішок до суспензії забезпечуючи седиментаційну стійкість ВВС протягом 5-6 діб без застосування хімічних домішок. Підтримання седиментаційної стійкості суспензії протягом більш тривалого часу можливе також з застосуванням хімічних домішок або періодичною короткотривалою рециркуляцією водовугільної суспензії з інтервалом 2-3 доби.

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

6. 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.

7. Встановлено, що зі збільшенням концентрації гідроксиду амонію в розчині від 0 до 0,15 мг/дм³ без обробки концентрація іонів кальцію знижується на 64 %, проте при швидкостях зсуву потоку $(20\div 40)\cdot 10^3\text{ с}^{-1}$ концентрація іонів кальцію знижується на 98,5÷99,3 % відповідно.

8. Встановлено, що зниження жорсткості води до значення менше 0,02 ммоль/дм³ відбувається при концентрації гідроксиду амонію 0,1–0,15 % мас. після 9–10 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/дм³.

9. Визначено, що для забезпечення показника жорсткості води 0,01 ммоль/дм³ оптимальний вміст гідроксиду амонію в розчині повинен становити 0,1 % мас. при швидкості зсуву потоку рідини $40\cdot 10^3\text{ с}^{-1}$, що узгоджується з загальноприйнятими вимогами щодо якості води для водогрійних котлів згідно яких жорсткість води не повинна перевищувати 0,01–0,02 ммоль/дм³.

РОЗДІЛ 4

РОЗРАХУНОК ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ЗДІЙСНЕННЯ ОПЕРАЦІЙ КАВІТАЦІЙНОЇ ДЕГАЗАЦІЇ РІДИН

Кавітаційна дегазація рідин є одним з методів інтенсифікації масообмінних процесів, що базується на видаленні розчинених газів під дією кавітаційного поля та гідродинамічних ефектів. Для реалізації даного процесу застосовуються апаратурні рішення, які забезпечують створення умов для ефективної дегазації рідини.

В даному розділі викладено методику розрахунку сопла Вентурі і роторно-пульсаційного апарата як кавітаційних реакторів для дегазації рідини. Отримані результати дозволяють обґрунтувати вибір оптимального обладнання для конкретних умов експлуатації.

Здійснена попередня оцінка розподілу за розміром газових мікробульбашок у воді з отриманням залежності, що дозволяє при заданні початкового розміру бульбашок у монодисперсному ансамблі визначити їхню концентрацію і точніше прогнозувати розвиток ситуації при скиданні тиску. Наведено методику і виконано чисельні експерименти з вивчення початкової стадії кавітації – формування та еволюції кавітаційного кластера, що визначає інтенсивність процесу дегазації використовуючи створені субмоделі кавітаційного реактора на базі сопла Вентурі та кавітаційного реактора на базі РПА розглянутих в другому розділі цієї роботи.

4.1. Моделювання сопла Вентурі як кавітаційного дегазатора

В пункті 2.5.1 розділу 2 наведено загальну методику розрахунку сопла Вентурі при його застосуванні як стаціонарного ГДКР для кавітаційної обробки рідини чи рідинних сумішей.

При застосуванні сопла Вентурі як кавітаційного реактора для дегазації рідини за схемою рециркуляції слід прийняти до уваги наступне.

Рідина після проходження через сопло Вентурі через короткий патрубок з діаметром d_0 надходить безпосередньо у вакуумну камеру в якій підтримується

постійний низький тиск, близький до тиску насиченої пари рідини при даній температурі.

Схему стенду рециркуляційної лінії дегазації води з застосуванням сопла Вентурі як кавітаційного реактора наведено на рис. 4.1.

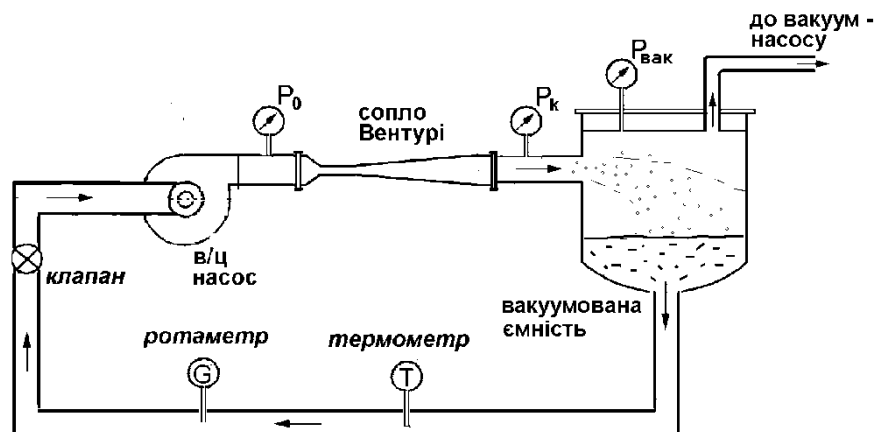


Рис. 4.1. Схема стенду кавітаційної дегазації води з застосуванням сопла Вентурі

Згідно з рис. 4.1 тиск на виході з сопла Вентурі $p_k = p_{vac} = \text{const}$. Тиск у камері p_{vac} повинен підтримуватись на мінімальній величині $p_{vac} \propto p_{sat}(T_l)$, що забезпечуються технічними можливостями застосованого 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, показана на рис. 2.12 розділу 2, взагалі не потрібна або повинна бути максимально відкритою ($S_{df} = S_0$), і тоді, у відповідності до формули (2.67), коефіцієнт опору діафрагми $\xi_{df} = 0$. За рахунок цього при тому ж перепаді тиску $p_0 - p_k$, згідно з формулою (2.62), 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.

Розрахунки коефіцієнтів опору конфузора ξ_{con} , горловини ξ_{thr} та дифузора ξ_{dif} проводяться за формулами наведеними в пункті 2.5.1 розділу 2.

Зауваження. Тут і далі в тексті дисертаційної роботи при позначеннях параметрів горловини сопла Вентурі (діаметр, довжина, коефіцієнт опору, тиск і швидкість на виході з горловини) будемо застосовувати загальноприйнятий нижній індекс “*thr*” від англійського throat – горловина.

Величина тиску p_{thr} у звуженому перерізі сопла є основним вихідним параметром моделі сопла Вентурі і будь-якої іншої моделі гідродинаміки каналу з застосуванням стаціонарних ГДКР. Отже, при застосуванні сопла Вентурі як кавітаційного реактора для проведення експериментальних досліджень на лабораторному стенді дегазації рідини або при нейтралізації кислих конденсатів, утворених з димових газів від котлоагрегатів, необхідно задати оптимальні параметри кутів розкриття конфузора α_{con} та дифузора α_{dif} , а також оптимальну довжину горловини сопла L_{thr} стосовно конкретної задачі дослідження. При заданому діаметрі трубопроводу рециркуляційної лінії лабораторного стенда d_0 (діаметрі каналу на вході та виході з сопла) ці параметри однозначно визначають геометрію і розміри сопла.

Методика розрахунку сопла Вентурі для дегазації будь-якої рідини проводиться на базі наступних рівнянь.

4.1.1. Методика розрахунку сопла Вентурі як кавітаційного реактора.

Для розрахунку швидкості та тиску в потоці однофазної в'язкої рідини на виході з горловини сопла Вентурі рівняння Бернуллі запишемо у вигляді

$$p_0 + \rho_l \frac{v_0^2}{2} = p_{thr} + \rho_l \frac{v_{thr}^2}{2} + (\xi_{con} + \xi_{thr}) \cdot \rho_l \frac{v_0^2}{2}, \quad (4.1)$$

де v_0 і p_0 – відповідно, швидкість і тиск у потоці рідини на вході в конфузор; v_{thr} і p_{thr} – відповідно, швидкість і тиск у потоці рідини на виході з горловини сопла; ξ_{con} та ξ_{thr} – коефіцієнти гідродинамічного опору конфузора та горловини.

Швидкість потоку в горловині сопла v_{thr} пов'язана зі швидкістю потоку на вході в сопло v_0 співвідношенням

$$v_{thr} = v_0 \cdot \frac{S_0}{S_{thr}} = v_0 \cdot \left(\frac{d_0}{d_{thr}} \right)^2, \quad (4.2)$$

де S_0 і S_{thr} – відповідно, площа перерізу трубопроводу та горловини. Підставляючи це значення в рівняння (4.1), отримаємо співвідношення для розрахунку тиску на виході з горловини

$$p_{thr} = p_0 - \rho_l \frac{v_0^2}{2} \left[\left(\frac{d_0}{d_{thr}} \right)^4 - 1 + \xi_{con} + \xi_{thr} \right]. \quad (4.3)$$

З рівнянь (4.1) – (4.3) випливає, що для заданої геометрії сопла, тобто для заданих значень $d_0, d_{thr}, L_{thr}, d_{df}, \alpha_{con}, \alpha_{dif}$, швидкість v_{thr} і тиск p_{thr} на виході з горловини сопла можна розрахувати, якщо відома швидкість потоку в трубопроводі v_0 . Застосовуючи рівняння Бернуллі для двох перерізів – на вході в сопло, де тиск рідини $p = p_0$, і на виході з сопла, де тиск $p = p_k$, визначаємо швидкість потоку на вході в сопло

$$v_0 = \sqrt{\frac{2(p_0 - p_{vac})}{\rho_l \cdot (\xi_{con} + \xi_{thr} + \xi_{dif})}}, \quad (4.4)$$

де ξ_{dif} – коефіцієнт гідродинамічного опору дифузора. Тоді густина кінетичної енергії у трубопроводі перед входом у сопло визначається як

$$\rho_l \frac{v_0^2}{2} = \frac{(p_0 - p_{vac})}{\xi_{con} + \xi_{thr} + \xi_{dif}}. \quad (4.5)$$

Підставляючи значення $\rho_l \cdot v_0^2/2$ в рівняння (4.3), отримаємо

$$p_{thr} = p_0 - (p_0 - p_{vac}) \cdot \frac{d_0^4/d_{thr}^4 - 1 + \xi_{con} + \xi_{thr}}{\xi_{con} + \xi_{thr} + \xi_{dif}}. \quad (4.6)$$

Введемо позначення

$$d_0^4/d_{thr}^4 - 1 + \xi_{con} + \xi_{thr} = Z_{thr}; \quad (4.7)$$

$$\xi_{con} + \xi_{thr} + \xi_{dif} = Z_k. \quad (4.8)$$

З урахуванням цих позначень перепишемо рівняння (4.6) у вигляді

$$p_{thr} = p_0 - (p_0 - p_{vac}) \cdot \frac{Z_{thr}}{Z_k}. \quad (4.9)$$

Ліва частина (4.9) – це перепад тиску на ділянці від входу сопла до виходу з горловини сопла. Використовуючи рівність (4.8), перепишемо рівняння (4.4) для визначення швидкості потоку в трубопроводі

$$v_0 = \sqrt{\frac{2 \cdot (p_0 - p_{vac})}{\rho_l \cdot Z_k}}. \quad (4.10)$$

З урахуванням рівнянь (4.3) і (4.7) швидкість потоку в трубопроводі v_0 можна також визначити також з наступного рівняння

$$v_0 = \sqrt{\frac{2 \cdot (p_0 - p_{thr})}{\rho_l \cdot Z_{thr}}}. \quad (4.11)$$

Об'ємну витрату рідини через сопло Вентурі $G_V = v_0 \cdot S_0$ можна визначити як з рівняння (4.10) у вигляді

$$G_V = S_0 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (p_0 - p_{vac})}{\rho_l \cdot Z_k}}, \quad (4.12)$$

так і з рівняння (4.11) у вигляді

$$G_V = S_0 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (p_0 - p_{thr})}{\rho_l \cdot Z_{thr}}}. \quad (4.13)$$

Рівняння (4.10) і (4.11) тотожні. Кожне з них може бути використано для визначення швидкості потоку на вході в сопло Вентурі v_0 , а з урахуванням співвідношення (4.2) також і для визначення швидкості в горловині сопла v_{thr} .

Так само будь яке з рівнянь (4.12) чи (4.13) може бути застосоване для розрахунку об'ємної витрати G_V .

Але тут існує принципова відмінність у застосуванні цих рівнянь для розрахунку сопла Вентурі. Після того як на виході з горловини виникли умови закипання рідини ($p_{thr} \leq p_{sat}(T_l)$) рівняння (4.10) та (4.12) вже не можна використовувати, оскільки на ділянці дифузора з постійною витратою тече паро-

рідинний потік бульбашкової структури, в якому по довжині дифузора постійно змінюється густина парорідинного середовища ρ_l і, відповідно, його швидкість.

При $p_{thr} \leq p_{sat}(T_l)$ рівняння Бернуллі вже не працює, в тому сенсі, що воно не може описувати розподіл швидкості і тиску в двофазному потоці по довжині дифузора. В цьому випадку для визначення швидкості v_0 і витрати G_V слід застосувати рівняння (4.11) або (4.13), які при будь яких режимах описують течію однофазної рідини на ділянці від входу в сопло до виходу з горловини. Очевидно, для застосування кожного з цих рівнянь має бути визначено величину тиску p_{thr} на виході з горловини. Задача спрощується за рахунок того, що у випадку течії через сопло однофазної рідини величина тиску p_{thr} визначається з рівняння (4.3), а у випадку течії в дифузоре закипаючої рідини тиск на виході з горловини, як зазначено вище, приймає постійне значення $p_{thr} \approx p_{sat}(T_l) = \text{const}$.

Тому за умови $p_{thr} \geq p_{sat}(T_l)$, коли течія рідини по всій довжині сопла ще однофазна, мінімальне значення тиску $p_{min} = p_{thr}$ визначаємо за формулою

$$p_{thr} = p_0 - (p_0 - p_{vac}) \frac{Z_{thr}}{Z_k}. \quad (4.14)$$

Цю формулу легко одержати, порівнюючи праві частини рівнянь (4.10) і (4.11) або рівнянь (4.12) і (4.13). Рівняння (4.14) дозволяє визначити тиск в рідині на виході з горловини p_{thr} в залежності від поточного тиску на виході з дифузора $p_k = p_{vac} = \text{const}$, що вимірюється манометром P_{vac} і контролюється манометром P_k , які зображені на рис. 4.1.

Для застосування наведених вище рівнянь при розрахунку сопла Вентурі необхідно знати чисельні значення коефіцієнтів гідравлічних опорів складових сопла, які є постійними величинами при заданій геометрії сопла і не залежать від режимних параметрів тисків на вході та на виході.

4.1.2. Розрахунок раціональної геометрії та оптимальних режимів роботи сопла Вентурі

Вибираємо стандартне сопло Вентурі з наступними геометричними параметрами: діаметр на вході в сопла $d_0 = 5$ см; кут розкриття конфузора $\alpha_{con} = 45^\circ$; кут розкриття дифузора $\alpha_{dif} = 15^\circ$, довжин сопла $L_{thr} = d_{thr}$; тиск в приймальній ємності $p_{vac} = 0,05$ атм. Для даного входного діаметра сопла $d_0 = 5$ см наведені значення кутів конфузора та дифузора приймаємо оптимальними.

Найменший вплив на процеси в солі Вентурі вносить кут розкриття конфузора α_{con} , який практично не впливає ні на інтенсивність кавітації, ні на витрати, можна довільно вибирати від 30° до 90° . Невелику роль відіграє в інтенсивності кавітації довжина горловини L_{thr} , але зі збільшенням довжини горловини дещо зменшується об'ємна витрата. Оптимальним варіантом вважаються значення $L_{thr} = (1 \div 2) \cdot d_{thr}$. В наступних розрахунках приймається, що $L_{thr} = d_{thr}$.

При розрахунку сопла Вентурі будь якого розміру і при будь-яких режимних параметрах (тиск на вході та в завантажувальній ємності, витрата рідини через сопло тощо) користуємося рівняннями та формулами (4.1) – (4.14), наведених в попередніх підрозділах. В наведених вище рівняннях тиск p_0 – тиск, який в експерименті вимірюється манометром P_0 (див. рис. 4.1); p_{vac} – тиск в приймальній ємності, який в експерименті вимірюється манометром P_{vac} і контролюється манометром P_k (див. рис. 4.1). G_V – об'ємна витрата рідинної суміші, яка в експерименті реєструється ротаметром і розраховується за формулою (4.13).

4.1.2.1. Процедура розрахунку оптимального діаметра горловини сопла Вентурі.

Розглянемо процедуру розрахунку стандартного сопла Вентурі наведеної вище геометрії. При цих даних вибираємо оптимальний діаметр сопла d_{thr} , який задовольняє умовам достатньої інтенсивності кавітаційної дії дегазації та потрібній величині об'ємної витрати G_V .

Для прикладу застосовуємо насос з потужністю, яка забезпечує постійний тиск на вході в сопло $p_0 = 2$ атм. При зменшенні діаметра сопла d_{thr} тиск p_0 , як показали проведені лабораторні дослідження, буде зростати. В експерименті для підтримання на манометрі P_0 постійного (середнього) значення тиску $p_0 = 2$ атм між насосом та манометром необхідно ставити проміжний регулюючий клапан та ввести байпасну лінію. В розрахунках приймається, що $p_0 = 2$ атм без уваги на те, яким чином це досягається.

Далі проводимо наступну віртуальну розрахункову процедуру для однофазної рідини, так що рівняння Бернуллі може застосовуватися без обмежень на всіх ділянках сопла.

1. За допомогою манометра P_{vac} перевіряємо тиск у приймальній камері при ввімкненому вакуумному насосі $p_{vac} = 0,05$ атм.

2. Розраховуючи по черзі сопла з різним діаметром горловини d_{thr} , починаючи від найменшого, проводимо для кожного з них розрахунок тиску на виході з горловини p_{thr} . Для розрахунку p_{thr} застосовуємо рівняння (4.14) для однофазної рідини. Розрахунки параметрів Z_{thr} та Z_k проводимо, відповідно, за формулами (7) та (8), враховуючи чергову зміну в них діаметра горловини d_{thr} , і відповідно за рівняннями (2.64) – (2.66) розділу 2 зміни опору конфузора ξ_{con} , опору горловини ξ_{thr} та опору дифузора ξ_{dif} , які залежать від d_{thr} .

Процедура розрахунку оптимального діаметра горловини необхідна для найбільш ефективної роботи сопла з точки зору врахування двох конкуруючих факторів – досягнення найбільшої інтенсивності колапсу кавітаційних бульбашок при достатньо високій продуктивності (витратах).

Результати розрахунку наведені в таблиці 4.1. Розглянута розрахункова процедура базується на тому, що, як показали численні експериментальні та аналітичні дослідження, в реальних соплах Вентурі найбільша кавітаційна інтенсивність досягається саме в тому інтервалі параметрів горловини, в якому в потоці віртуальної однофазної рідини тиски на виході з горловини приймають найменші значення.

Таблиця 4.1. Попередній вибір оптимального діаметра горловини

№ з/п	Діаметр горловини d_{thr} , см	Відношення діаметрів d_{thr}/d_0	Тиск на виході з горловини P_{thr} , атм
1	1,0	0,2	-1,185
2	1,5	0,3	-1,40
3	2,0	0,4	-1,61
4	2,5	0,5	-2,00
5	3,0	0,6	-2,211
6	3,1	0,62	-2,220
7	3,2	0,64	-2,217
8	3,3	0,66	-2,19
9	3,4	0,68	-2,15
	3,5	0,70	-2,08
	4,0	0,8	-1,38

З таблиці видно що даному випадку 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.

В цьому прикладі оптимальне значення діаметра горловини $d_{thr} = 3,1$ см, а оптимальне відношення діаметрів $d_{thr}/d_0 = 0,62$. Коефіцієнт гідравлічного опору горловини сопла визначаємо за формулою (4.15), підставляючи в неї значення $d_{thr} = 3,1$ см і $L_{thr} = d_{thr} = 3,1$ см. Звідси одержимо

$$\xi_{thr} = \frac{\lambda_{fr} L_{thr}}{d_{thr}} \cdot \left(\frac{d_0}{d_{thr}} \right)^4 = \lambda_{fr} \cdot \left(\frac{d_0}{d_{thr}} \right)^4 = 0,04 \cdot \left(\frac{5}{3,1} \right)^4 = 0,27. \quad (4.15)$$

За формулами (2.64) та (2.66) визначаємо критичні значення опорів конфузора ξ_{con} та дифузора ξ_{dif} , підставляючи в них значення $d_{thr} = 3,1$ см. Опір горловини сопла ξ_{thr} вже розраховано за формулою (2.64). Визначені таким чином значення ξ_{thr} , ξ_{con} та ξ_{dif} підставляємо в рівняння (4.7) та (4.8) і знаходимо критичні значення Z_k та Z_{thr} . Значення одержаних критичних опорів представлені в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2. Опори складових сопла Вентурі при діаметрі горловини $d_{thr} = 3,1$ см

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

Після виконання цих процедур параметри в правій частині формули (4.13) визначено і можемо застосувати її для попередньої оцінки величини об'ємної витрати рідини через сопло Вентурі.

4.1.2.2. Об'ємна витрата рідини через сопло в кавітаційному режимі

Проведемо обчислювальний експеримент для визначення критерію переходу течії в соплі Вентурі до кавітаційного режиму при якому тиск на виході з горловини спадає до критичного значення $p_{thr} = p_{sat}(T_l)$. Для цього при визначеному оптимальному діаметрі горловини $d_{thr} = 3,1$ см будемо поступово збільшувати тиск p_0 на вході в сопло, починаючи від значення $p_0 = p_{vac}$, коли сопло перекрито і згідно з рівняннями (4.12) та (4.13) витрата рідини через нього дорівнює нулю. У відповідності до тих же рівнянь при збільшенні тиску p_0 зростатиме витрата рідини через сопло G_V і, у відповідності до рівнянь (4.10), (4.11) та (4.2), зростатиме швидкість потоку в трубопроводі v_0 і швидкість течії через горловину v_{thr} . Згідно з законом Бернуллі при зростанні швидкості v_{thr} тиск в горловині p_{thr} буде спадати, поки не досягне значення тиску насиченої пари $p_{thr} = p_{sat}(T_l)$, після чого відбувається так зване запирання потоку. При подальшому збільшенні тиску p_0 до будь-якої величини тиск на виході з горловини залишається постійним ($p_{thr} = p_{sat}(T_l)$), так само, як і витрата рідини через сопло.

В кавітаційному режимі течії стаціонарна об'ємна витрата рідини через сопло G_{Vst} визначається з рівняння (4.13), яке після підстановки значення $p_{thr} = p_{sat}(T_l)$ зводиться до вигляду

$$G_V = S_0 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (p_0 - p_{sat}(T_l))}{\rho_l \cdot (d_0^4/d_{thr}^4 - 1 + \xi_{con} + \xi_{thr})}}. \quad (4.16)$$

В (4.2) всі величини відомі і постійні, що дозволяє розрахувати об'ємну витрату суспензії через сопло в кавітаційному режимі.

З умови нерозривності потоку випливає, що масова витрата в дифузорі G_m така ж сама, як в конфузорі і в горловині, але в конфузорі і в горловині ми точно визначаємо густину рідини, розподіл швидкості потоку та тиску в рідині по довжині каналу. Але цього не можна зробити для дифузора, в якому густина двофазного потоку суттєво змінюється по його довжині через послідовну зміну об'єму бульбашок в процесі їх зростання, стиснення та колапсу. Об'ємна витрата G_V через дифузор відрізняється від об'ємної витрати через конфузор або горловину, оскільки гідравлічний опір дифузора ξ_{dif} змінюється, тоді як опори конфузора ξ_{con} і горловини ξ_{thr} залишаються незмінними. Саме з цих причин не можна використати рівняння (4.12) для розрахунку витрати через сопло в кавітаційному режимі.

4.2. Застосування роторно-пульсаційного апарата як гідродинамічного кавітаційного реактора для дегазації рідин

Основні технічні характеристики РПА, застосованого як кавітаційний реактор, наведені в табл. 3.1. Дослідження проводили для апарата з постійним числом обертів роторів $\Omega = 3000$ об/хв (кутова швидкість $\omega = 314$ с⁻¹) і шириною міжциліндрового зазору $\delta = 0,5$ мм. При цьому частота перекриття каналів роторів і статора $f = \Omega N_{or}$, а період перекриття каналів $\Delta T_f = 333$ мкс.

На рис. 4.2 показано, як змінюється швидкість течії в радіальному напрямі через канали РПА протягом чотирьох періодів перекриття. З рисунка видно, що при кожному перекритті отворів швидкість змінюється від 0,2 м/с до 4,6 м/с.

В момент повного розкриття каналів, коли отвори роторів і статора взаємно співпадають, рідина вільно проходить через канали РПА. При подальшому перекритті отворів потік рідини в каналах поступово гальмується. В момент повного перекриття потік рідини через канали I ротора і статора практично повністю зупиняється. Але в каналах II ротора, який постійно сполучений через трубопровід з вакуумною камерою (див. рис. 2.18 та рис. 5.1), рідина за інерцією продовжує

рухатись, внаслідок чого всередині каналів II ротора спостерігається розрив потоку рідини через різке спадання тиску. В каналах I ротора і статора в момент повного перекриття отворів тиск, навпаки, різко зростає внаслідок стиснення рідини при гальмуванні потоку.

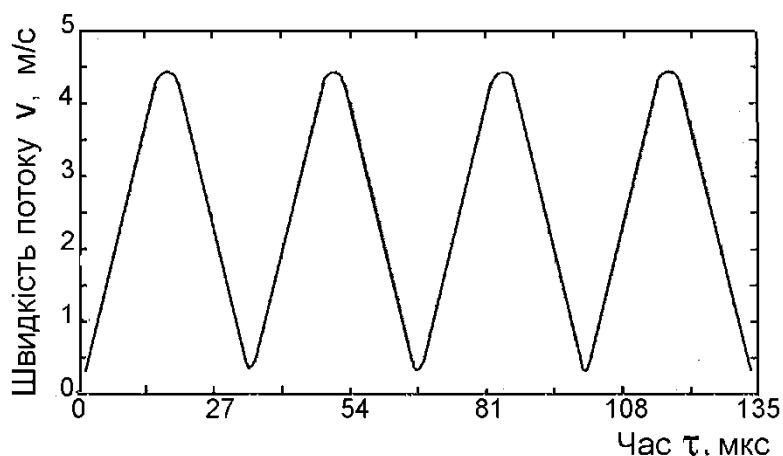


Рис. 4.2. Зміна з часом швидкості течії через канали РПА протягом чотирьох періодів перекриття отворів роторів і статора.

Таким чином, при кожному перекритті отворів в каналах роторів і статора періодично виникають кавітаційні ефекти. Це зумовлює інтенсивне зростання у розмірі великої сукупності парогазових бульбашок в рідині, що може призвести до їх коагуляції і можливої інверсії структури потоку її з бульбашково-рідинної в крапельно-газову структуру.

4.2.1 Особливості зміни тиску в рідині у вихідному перерізі статора роторно-пульсаційного апарата

Для розрахунку динаміки зростання або стиснення парогазових бульбашок при проходженні рідини через в ГДКР в системі рівнянь моделі ДБА треба навести в аналітичному вигляді рівняння, яке адекватно описує характер зміни зовнішнього тиску в рідині як функцію часу $p_l = f(\tau)$.

В задачі обробки рідини в РПА таке аналітичне рівняння має відображувати характер зміни тиску в рідині на вході в II ротор за період одного перекриття отворів РПА. Для цього для одного з режимів обробки в аналітичному вигляді наводили залежність, одержану в математичній моделі РПА, розглянутій в

підрозділі 2.6.3 другого розділу. Цю залежність наведено на рис. 4.3 для 15 періодів перекриття каналу і на рис. 4.4 для трьох періодів його перекриття.

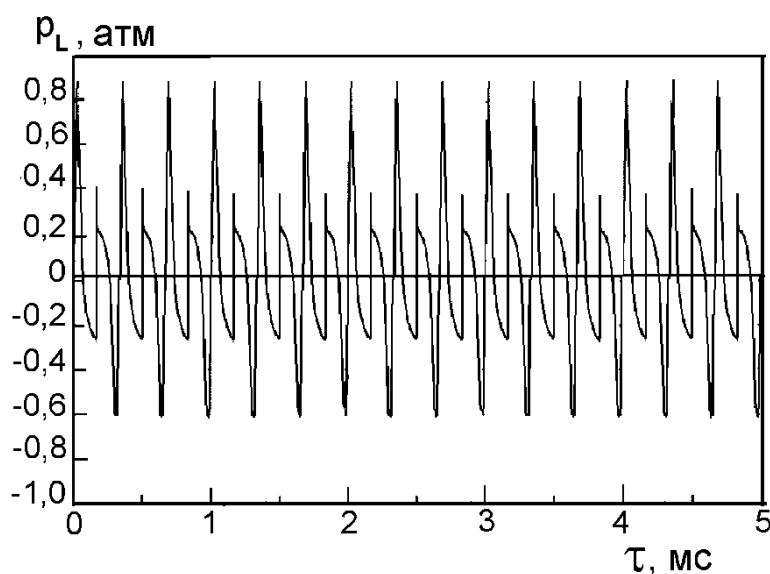


Рис. 4.3. Зміна з часом тиску в потоці рідини на межі між статором і зовнішнім ротором за 15 періодів перекриття отворів. Розрахунок за рівняннями моделі РПА. Кутова швидкість ротора $\omega = 314$ рад/с. Тиски рідини на вході в РПА p_0 і на виході з РПА p_k дорівнюють 0,2 атм.

На рисунку 4.3 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 захоплення 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 $R \leq 0,5$ мкм, які потім у вигляді кавітаційного кластера бульбашково-рідинної або крапельної структури входять з потоком безпосередньо у вакуумовану камеру, звідки виводяться вакуумним насосом.

Для більш повного уявлення про характер зміни тиску в рідині за час її перебування в каналі статора на рис. 4.4 представлені ті ж самі дані, що і на попередньому рисунку, але в більшому масштабі.

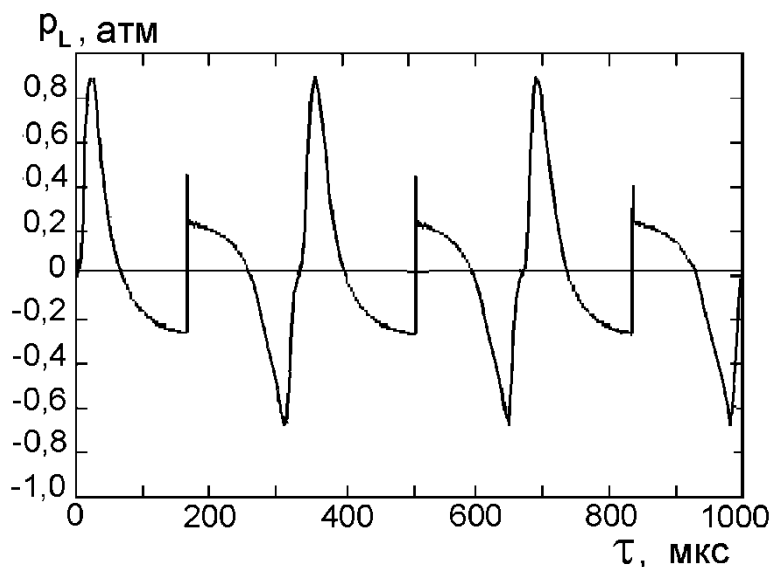


Рис. 4.4. Зміна з часом тиску в потоці рідини на межі між статором і зовнішнім ротором за 3 періоди перекриття отворів. Розрахунок за рівняннями моделі РПА. Кутова швидкість ротора $\omega = 314$ рад/с. Тиски рідини на вході в РПА p_0 і на виході з РПА p_k дорівнюють 0,2 атм.

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.

4.2.2. Руйнування газових дисперсій під дією зсувних напружень в міжциліндрових зазорах РПА

За допомогою моделі, розглянутої в підрозділі 2.6.2, виконані дослідження пов'язані з аналізом умов руйнування повітряних бульбашок при високих значеннях швидкості зсуву порядку 10^4 с⁻¹. При проведенні обчислювального експерименту

для точної оцінки реальних значень швидкості зсуву були використані технічні характеристики РПА наведені в таблиці 3.1 розділу 3.

Дослідження проводилися у припущенні ізотермічного режиму течії рідини через РПА при постійній температурі $T_l = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

У ході обчислювального експерименту визначався критичний радіус бульбашок R_{cr} , перевищення якого призводило до «вибуху» – незворотного розтягування бульбашки та обов'язкового її руйнування. Розраховувалися залежності ступеня деформації бульбашки $a/R = f(\tau)$ для бульбашок різного розміру за інших режимних параметрів. Це дозволило оцінити в кожній серії дослідів величини R_{cr} і детально проаналізувати характер деформування бульбашок в докритичній ($R < R_{cr}$) та закритичній області ($R \geq R_{cr}$) та визначити критерії їх руйнування.

Експеримент показав, що характер деформації повітряних бульбашок у критичній області якісно змінюється за зміни режиму обтікання, тобто залежить від величини числа Re .

На рисунку 4.5, де суцільною фазою є вода, здійснюється суто інерційний режим обтікання ($Re \propto 100$). Як показують отримані нами результати, при радіусах $R < R_{cr}$ для цього режиму характерна наявність загасаючих осциляцій форми краплі до її повної стабілізації. По мірі наближення R до R_{cr} амплітуда коливань та їх тривалість зростають, а крапля стабілізується при все вищих значеннях a/R поки при подальшому збільшенні розміру послідовно досліджуваних бульбашок радіус бульбашки не досягне значення $R \geq R_{cr}$, якому відповідає критичне значення ступеня деформації $(a/R)_{cr}$, що приводить до безповоротного розтягування бульбашки та її «вибухового» руйнування з утворенням великої кількості дрібних мікробульбашок.

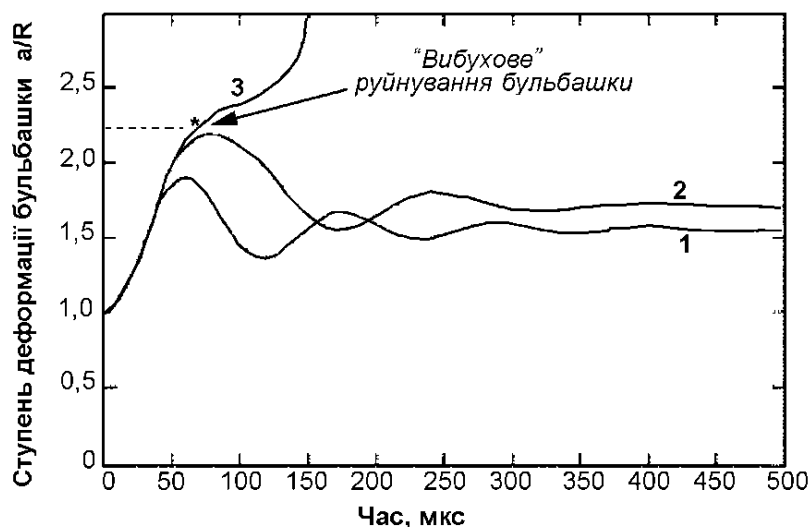


Рис.4.5. Зміна в часі ступеня деформації a/R при деформуванні бульбашок повітря у зсувному потоці води при постійній швидкості зсуву $G = 47000 \text{ с}^{-1}$ для трьох значень радіуса бульбашки R : 1 – 1,80 мкм; 2 – 1,83 мкм; 3 – 1,85 мкм.

Теплофізичні параметри системи: $\rho_d = 2 \cdot 10^{-3} \text{ г/см}^3$; $\rho_c = 1,0 \text{ г/см}^3$;
 $\mu_d = 1,82 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}$; $\mu_c = 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$; $\sigma = 72 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}$.

На рисунку 4.6, де суцільною фазою є високов'язке моторне мастило, розтягнення крапель і бульбашок з радіусами $R < R_{cr}$ до стабільного значення перебігає монотонно, так само як і їх необоротне подовження після «вибуху» при $R \geq R_{cr}$. У якісному відношенні характер цих залежностей не відрізняється від тих, які спостерігаються в класичних експериментах для стоксівського режиму при істотно менших значеннях швидкості зсуву. Відміна характеру руйнування бульбашок у воді і в моторному мастилі пояснюється тим, що в'язкість моторного мастила в 200 разів перевищує в'язкість води, завдяки чому осциляції бульбашки миттєво загасають. Окрім того, як видно з рисунків 4.5 та 4.6, внаслідок високої в'язкості моторного мастила як суцільної фази розтягування і наступне руйнування бульбашок в зазорах РПА за інших рівних умов відбувається значно повільніше, ніж у воді, відповідно за 600 мкс і за 50 мкс. При цьому величина зсувних напружень $p_{sh} = \mu_c G_{sh}$, що деформують та руйнують бульбашки та краплини в зазорах у моторного мастила значно більша ніж у води.

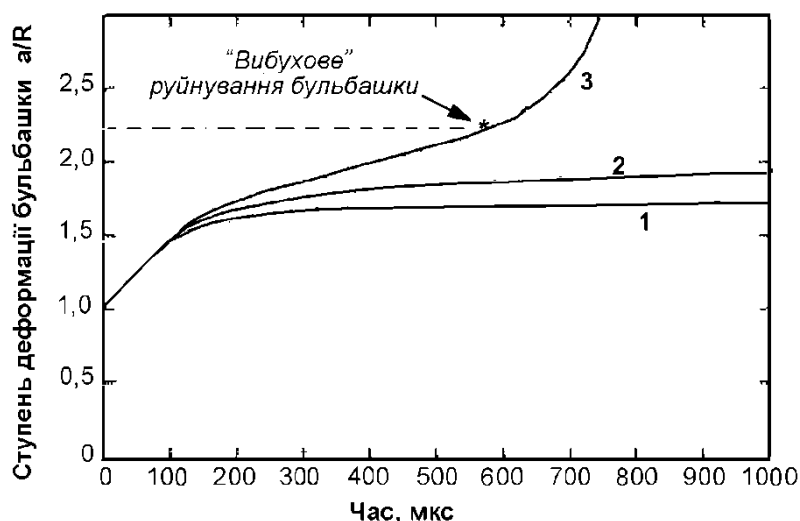


Рис.4.6. Зміна в часі ступеня деформації a/R при деформуванні бульбашок повітря у потоці моторного масла при постійній швидкості зсуву $G = 47000 \text{ с}^{-1}$ для трьох значень радіуса бульбашки R : **1** – 1,80 мкм; **2** – 1,83 мкм; **3** – 1,85 мкм.

Теплофізичні параметри системи: $\rho_d = 2 \cdot 10^{-3} \text{ г/см}^3$; $\rho_c = 0,8 \text{ г/см}^3$;
 $\mu_d = 1,82 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}$; $\mu_c = 0,2 \text{ Па} \cdot \text{с}$; $\sigma = 40 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}$.

Безповоротне деформування та руйнування газових бульбашок та крапель в міжциліндрових зазорах роторно-пульсаційних апаратів під дією зсувних напружень відбувається в інерційному режимі при високих значеннях швидкості зсуву, які на чотири порядки перевищують швидкості зсуву для стоксівського режиму. За рахунок цього в зазорах РПА легко руйнуються бульбашки з радіусами порядку 1 мкм, тоді як в стоксівському режимі – бульбашки з радіусами 1-2 мм.

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.

4.3. Визначення розподілу за розміром газових зародків у воді

До недавнього часу не існувало надійних методів вимірювання густини зародків у вільній течії рідини для використання в рідких системах будь-якого розміру. Використовувалися в основному методи, які включають аналіз зразків за допомогою лічильника Коултера, а також акустичні методи і методи розсіювання

світла. Однак, найбільш достовірні дані, за думкою багатьох дослідників, отримано з голограм рідини, які можна реконструювати і досліджувати під мікроскопом.

Для підрахунку кавітаційних зародків був використаний метод, який включає відбір проби рідини і всмоктування її через маленьку трубку Вентурі. Газові зародки ростуть при низькому тиску в горловині сопла і їх кількість може бути підрахована за умови, що концентрація їх достатньо мала, щоб події були розділені в часі. Тоді концентрації зародків можна оцінити як функції рівня тиску в горловині, якщо швидкість потоку відома. Такі пристрої, відомі як вимірювачі чутливості кавітації, як правило, обмежуються концентраціями менш 10 см^{-3} .

Якщо б всі газові зародки у вільному потоці були однаковими за складом і за природою, можна було б зробити висновок, що певне розтягування рідини Δp активує всі зародки, більші ніж $\beta \Delta p / S$, де β є сталою величиною. Однак, відсутність інформації про склад і природу зародків, а також про інші механічні властивості рідини знижує цінність такого твердження [1].

4.3.1. Алгоритм розрахунку газовмісту рідини

Нехай в рідині знаходиться велика кількість стабільних газових зародків різного розміру, які визначають загальний вміст газу в рідині. Припускається, що парогазові зародки мають форму сфери з радіусом R . Розміри присутніх в рідині стабільних зародків знаходяться в інтервалі від R_{min} до R_{max} .

Нижня межа ($R = R_{min}$) визначається з розміру критичних зародків і знаходиться в області десятка нанометрів. Верхня межа умовно визначається радіусом парогазових бульбашок, які знаходяться у відстояній рідині протягом доволі тривалого часу, не спливаючи під дією сили Архімеда. Очевидно, що значення верхньої межі радіуса бульбашки R_{max} залежить як від властивостей рідини (густини, поверхневого натягу, в'язкості), так і від властивостей присутнього в них газу (або суміші газів), а також від температури рідини.

Кількість газових зародків в одиниці об'єму рідини у фракційному інтервалі $R + \Delta R$ (або об'ємну концентрацію бульбашок цієї фракції) позначимо $N_b(R)$, а

густину об'ємної концентрації зародків цього фракційного складу позначимо $N_{\Delta R}(R)$. Це означає, що густина кількості бульбашок, які містяться в одиниці об'єму рідини в цьому фракційному інтервалі $N_{\Delta R}(R)$, визначається як

$$N_{\Delta R}(R) = N_b(R)/\Delta R . \quad (4.17)$$

Параметр N_b має розмірність м^{-3} , а параметр $N_{\Delta R}(R)$, відповідно, м^{-4} . Якщо для даної газорідинної суміші визначено розподіл фракційної густини кількості бульбашок за розмірами $N_{\Delta R}(R) = f(R)$, то кількість всіх бульбашок з радіусами від R_{min} до R_{max} , які стабільно перебувають в одиниці об'єму рідини, визначається, як сума бульбашок всіх фракцій в інтервалі $R_{min} \div R_{max}$.

$$N_b = \sum_{R_{min}}^{R_{max}} N_{\Delta R}(R_i) \cdot \Delta R_i . \quad (4.18)$$

Переходячи до межі $\Delta R \rightarrow 0$, визначимо загальну кількість бульбашок в одиниці об'єму рідини за рівнянням

$$N_b = \int_{R_{min}}^{R_{max}} N_{\Delta R}(R) \cdot dR . \quad (4.19)$$

Тоді кількість бульбашок в одиниці об'єму рідини в інтервалі від будь-якого розміру R до R_{max} визначається за рівнянням

$$N_b = \int_R^{R_{max}} N_{\Delta R}(R) \cdot dR . \quad (4.20)$$

Об'єм одиничної бульбашки $V_R = 4\pi R^3/3$. Тоді об'єм всіх бульбашок в одиниці об'єму рідини визначає її загальний газовміст, який визначається з рівняння

$$\beta_g = \frac{4\pi}{3} \int_{R_{min}}^{R_{max}} N_{\Delta R}(R) \cdot R^3 \cdot dR , \quad (4.21)$$

якщо відомий розподіл фракційної густини кількості бульбашок за розмірами.

Об'ємна частка вільного газу в одиниці об'єму рідини, який міститься в бульбашках з розмірами від R_1 до R_2 визначається згідно формули

$$\beta_g(R_1, R_2) = \frac{4\pi}{3} \int_{R_1}^{R_2} N_{\Delta R}(R) \cdot R^3 \cdot dR. \quad (4.22)$$

Для кількісної оцінки зазначених параметрів необхідно знати розподіл фракційної щільності числа бульбашок за розмірами в досліджуваній рідині.

В монографії Кр. Бреннена [1] у вигляді графіка наведені чотири експериментальні залежності розподілу фракційної щільності кількості бульбашок за розмірами отримані різними колективами авторів для водопровідної води різного ступеня очищення, а також для морської води. Залежності $N_{\Delta R}(R) = f(R)$ наведені на графіку в логарифмічному масштабі в інтервалі радіуса бульбашок від 10 мкм до 350 мкм.

Представлені Кр. Бренненом дані зображені на рис. 4.7 а. Всі чотири залежності відображають загальну тенденцію – зі збільшенням розміру бульбашок фракційна густина їх кількості зменшується. Зі зростанням радіуса бульбашок в 30 разів їх фракційна густина в одиниці об'єму рідини знижується на 4-5 порядків. З рис. 4.4 а також видно, що в зазначеному інтервалі розмірів залежність $\lg[N_{\Delta R}(R)] = f(\lg R)$ в першому наближенні може бути апроксимована прямою лінією.

Використовуючи дані зображених на рис. 4.7 а кривих проведемо на їх основі усереднення і отримаємо наближену апроксимацію залежності у вигляді прямої лінії, яка показана на рис. 4.7 б.

Для точної оцінки розподілу газових бульбашок в досліджуваній рідині необхідно провести трудомісткі вимірювання з використанням прецизійних акустичних або оптичних методів. При цьому точність і достовірність отриманих результатів до теперішнього часу викликає обґрунтовані сумніви. Тому використання наближеної апроксимації в цьому дослідженні для проведення якісного аналізу видається цілком виправданою.

Показана на рис. 4.7 б лінійна залежність $\lg[N_{\Delta R}(R)] = f(\lg R)$ описує розподіл фракційної густини газових бульбашок за розмірами в одиниці об'єму рідини в логарифмічному інтервалі розміру бульбашок від $\lg R_1 = 1$ до $\lg R_2 = 2,5$.

Це відповідає інтервалу розмірів бульбашок від 10 мкм до 316 мкм. В цьому інтервалі фракційна густина бульбашок в логарифмічних координатах змінюється від значення $\lg[N_{\Delta R}(R_1)] = 12$ до значення $\lg[N_{\Delta R}(R_2)] = 8,3$.

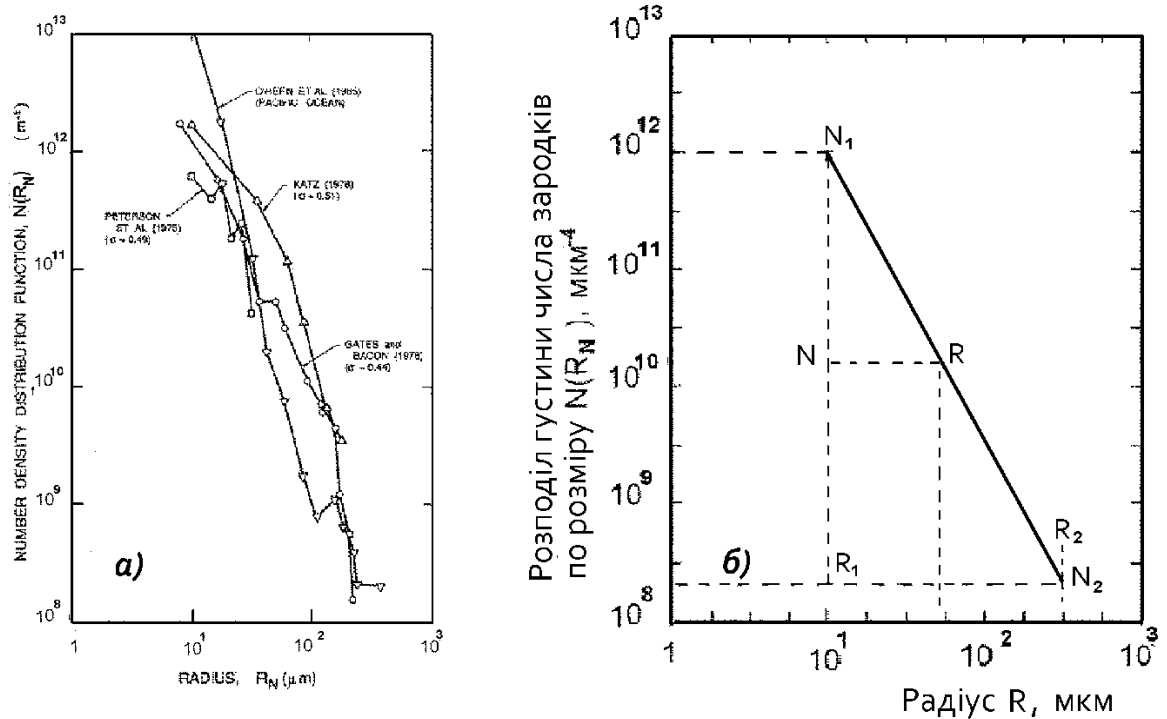


Рис. 4.7. Розподіл фракційної густини газових зародків за розмірами в рідині: *а* – згідно даних [1]; *б* – апроксимація відомих даних у дистильованій воді.

Наведене на рис. 4.7 *б* лінійне наближення залежності $\lg[N_{\Delta R}(R)] = f(\lg R)$ описується рівнянням

$$\frac{\lg[N_{\Delta R}(R_1)] - \lg[N_{\Delta R}(R)]}{\lg R - \lg R_1} = \frac{\lg[N_{\Delta R}(R_1)] - \lg[N_{\Delta R}(R_2)]}{\lg R_2 - \lg R_1} = k, \quad (4.23)$$

звідки випливає, що

$$\lg[N_{\Delta R}(R_1)] - \lg[N_{\Delta R}(R)] = k(\lg R - \lg R_1). \quad (4.24)$$

Рівняння (4.24) можна переписати у вигляді

$$\lg\left(\frac{N_{\Delta R}(R)}{N_{\Delta R}(R_1)}\right) = -k \cdot \lg\left(\frac{R}{R_1}\right). \quad (4.25)$$

Тоді логарифмічний розподіл фракційної густини газових бульбашок за розмірами в одиниці об'єму рідини описується рівнянням

$$N_{\Delta R}(R) = N_{\Delta R}(R_1) \cdot \left(\frac{R}{R_1}\right)^{-k}. \quad (4.26)$$

Використовуючи наведені вище значення $\lg[N_{\Delta R}(R_1)]$, $\lg[N_{\Delta R}(R_2)]$, $\lg R_1$ та $\lg R_2$, визначаємо з рівняння (4.23) коефіцієнт $\lg[N_{\Delta R}(R)]$ та $\lg R$, а також чисельні значення константи R_1 і константи $N_{\Delta R}(R_1)$. В результаті проведених розрахунків знаходимо: $R_1 = 10$ мкм, $N_{\Delta R}(R_1) = 10^{12} \text{ м}^{-4}$ і $k=2,47$. Підставляючи ці значення в рівняння (4.26), остаточно отримаємо

$$N_{\Delta R}(R) = 10^{12} \cdot (0,1R)^{-2,47}. \quad (4.27)$$

Рівняння розподілу фракційної густини газових бульбашок за розмірами в одиниці об'єму рідини можна представити у загальному вигляді

$$N_{\Delta R}(R) = a \cdot \left(\frac{R}{b}\right)^{-k}. \quad (4.28)$$

4.3.2. Визначення загального числа бульбашок в одиниці об'єму рідини

Підставляючи отриману залежність $N_{\Delta R}(R) = f(R)$ в рівняння (4.19) знайдемо кількість бульбашок в одиниці об'єму рідини в інтервалі розмірів від R_{min} до R_{max} .

$$N_b = N_{\Delta R}(R_1) \int_{R_{min}}^{R_{max}} \left(\frac{R}{R_1}\right)^{-2,47} \cdot dR = \frac{N_{\Delta R}(R_1)}{1,47 \cdot R_1^{-2,47}} [(R_{max})^{-1,47} - (R_{min})^{-1,47}]. \quad (4.29)$$

Після очевидних перетворень рівняння набуває вигляду

$$N_b = \frac{N_{\Delta R}(R_1) \cdot R_{min}}{1,47} \left[\left(\frac{R_{max}}{R_{min}}\right)^{-1,47} - 1 \right]. \quad (4.30)$$

Підставимо чисельні значення параметрів

$$N_b = \frac{10^{12} \text{ м}^{-4} \cdot 10 \text{ мкм}}{1,47} \left[\left(\frac{316,2}{10}\right)^{-1,47} - 1 \right] = \frac{10^7}{1,47} \cdot [(31,62)^{-1,47} - 1]. \quad (4.31)$$

В результаті знаходимо, що кількість всіх бульбашок в зазначеному інтервалі розмірів в одному кубічному метрі рідини становить $N_b = 1,48 \cdot 10^7 \text{ м}^{-3}$, але у воді ще присутня величезна кількість бульбашок меншого розміру з $R \leq R_{min}$.

4.3.3. Визначення об'ємного вмісту газу в рідині

Підставляючи визначений з рівняння (4.26) розподіл фракційної густини газових бульбашок за розмірами в одиниці об'єму рідини у рівняння (4.21), визначимо загальний газовміст рідини у вигляді рівняння

$$\beta_g(R_{min}, R_{max}) = \frac{4\pi \cdot 10^{12}}{3} \int_{R_{min}}^{R_{max}} \left(\frac{R}{R_{min}}\right)^{-2,47} \cdot R^3 \cdot dR. \quad (4.32)$$

Виконавши операцію інтегрування в (4.32) отримаємо рівняння

$$\beta_g(R_{min}, R_{max}) = \frac{4\pi \cdot 10^{12}}{3 \cdot 1,53} \left[\frac{R_{max}^{1,53}}{R_{min}^{-2,47}} - \frac{R_{min}^{1,53}}{R_{min}^{-2,47}} \right] = \frac{4\pi \cdot 10^{12}}{3 \cdot 1,53} \left[\left(\frac{R_{max}}{R_{min}}\right)^{1,53} R_{min}^4 - R_{min}^4 \right],$$

яке після простих перетворень зведеться до рівняння

$$\beta_g(R_{min}, R_{max}) = \frac{4\pi \cdot 10^{12} \cdot R_{min}^4}{3 \cdot 1,53} \left[\left(\frac{R_{max}}{R_{min}}\right)^{1,53} - 1 \right]. \quad (4.33)$$

Звідси знаходимо значення об'ємного газовмісту води в зазначеному інтервалі розміру парогазових зародків $\beta_g(R_{min}, R_{max}) = 5,38 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3 \text{ газу/ м}^3 \text{ води}$.

Розглянутий в цьому підрозділі алгоритм розрахунку об'ємної концентрації газових зародків у воді N_b та початкового газовмісту води β_g можна застосувати для будь якої рідини. Для цього необхідно для даної рідини мати попередньо визначені достовірні експериментальні дані стосовно густини об'ємної концентрації зародків заданого фракційного складу $N_{\Delta R}(R)$, такі, наприклад, які наведено на рис. 4.7 а для води. 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.

4.4. Розрахунок сопла Вентурі як кавітаційного дегазатора

4.4.1. Проведення обчислювальних експериментів. Методика дослідження

З метою розробки математичної моделі кавітаційного гідродинамічного дегазатора проведено обчислювальні експерименти з дегазації води з застосуванням сопла Вентурі, що дозволяє генерувати більшу кількість бульбашок і продовжувати

термін їх існування у порівнянні, наприклад, з діафрагмою чи з пластинкою з отворами, а крім того забезпечує можливість більш точного теоретичного аналізу.

У даному дослідженні використовували сопло Вентурі наступної геометрії: кут розкриття конфузора $\alpha_{con} = 60^\circ$, кут розкриття дифузора $\alpha_{dif} = 12^\circ$, діаметр каналу перед конфузоровим і на виході з дифузора $d_0 = 5$ 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 $p_{vac} = 0,1$ атм $= const$. Результати дослідження, наведені в цій роботі, отримані при тиску на вході в сопло $p_0 = 4$ атм.

Аналіз процесу формування, зростання та подальшої еволюції парогазових бульбашок час їх проходження через сопло Вентурі проведено в на базі математичної моделі динаміки бульбашкового ансамблю (модель ДБА). В моделі використані загальноприйняті припущення про монодисперсність бульбашок нвході сопла і про відсутність їх дроблення та коагуляції. До початкових умов входить радіус газових зародків R_0 та їх масова концентрація N_b (г^{-1}), яка вважається постійною протягом всього процесу. Зміна тиску в рідині на ділянці від входу в конфузор і до виходу з горловини $p_l = f(\tau)$ визначалась за рівнянням Бернуллі, яке входить до базових рівнянь моделі.

У цьому дослідженні проведено багатофакторний обчислювальний експеримент зі змінними R_0 , N_b , та діаметром горловини d_{thr} . Дослідження проведено при температурі води $T_l = 20^\circ\text{C}$.

Було проведено попередню оцінку розподілу за розміром газових мікробульбашок у воді. На підставі узагальнення сукупності експериментальних даних щодо вмісту вільного повітря у звичайній воді, наведених у роботі [1], отримано емпіричну формулу для оцінки кількості мікробульбашок повітря в одиниці об'єму води залежно від їхнього радіуса в загальному вигляді $N_{b0} = AR_0^{-1.4}$ (R_0 – мкм, N_{b0} – см^{-3}), яка впливає з рівняння (4.30) і доволі точно апроксимує експериментальні дані в інтервалі розмірів мікрозародків $R_0 = 0,5 \div 20$ мкм.

Отримана залежність, що наведена на рис. 4.8 дозволяє при заданні початкового розміру бульбашок R_0 у монодисперсному ансамблі визначити їхню концентрацію N_{b0} і точніше прогнозувати розвиток ситуації при скиданні тиску [1].

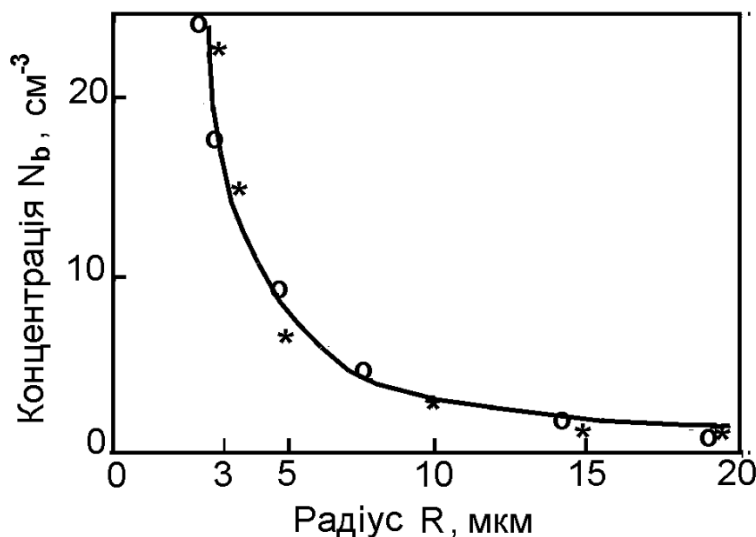


Рис. 4.8. Розподіл мікробульбашок повітря у воді за розмірами (розрахунок за експериментальними даними [1])

4.4.2. Результати дослідження і їх обговорення

До завдання дослідження входило визначення швидкості зміни тиску в рідині всередині кластера $p_{cl} = f(\tau)$ в залежності від зміни зовнішнього тиску в конфузорній частині сопла, яке розраховується за рівнянням Бернуллі.

У звичайній воді знаходиться велика кількість рівноважних газових зародків в інтервалі розмірів від 0,1 до 100 мкм, які при сильному скиданні зовнішнього тиску можуть активуватись і ставати центрами кавітації. Величина критичного тиску p_{lcr} , при якому відбувається незворотне зростання бульбашки з радіусом R_0 визначається умовою: $p_{lcr} \leq 2\sigma/R_0 - p_{sat}(T_{l0})$, де σ – поверхневий натяг води. З цієї формули випливає, що при $T_l = 20^\circ\text{C}$ для активації бульбашок малого розміру з $R_0 \leq 15$ мкм тиск повинен перейти в область негативних значень, тобто бути «розтягуючим» [186, 272, 273]. Розрахунки показують, що при відсутності у воді зародків з $R_0 > 0,1$ мкм критичний тиск у горловині з $d_1 = 4$ см мав би знизитись до значення $p_{lcr} \approx -8$ атм, а в горловині з діаметром $d_1 = 1$ см – до -20 атм.

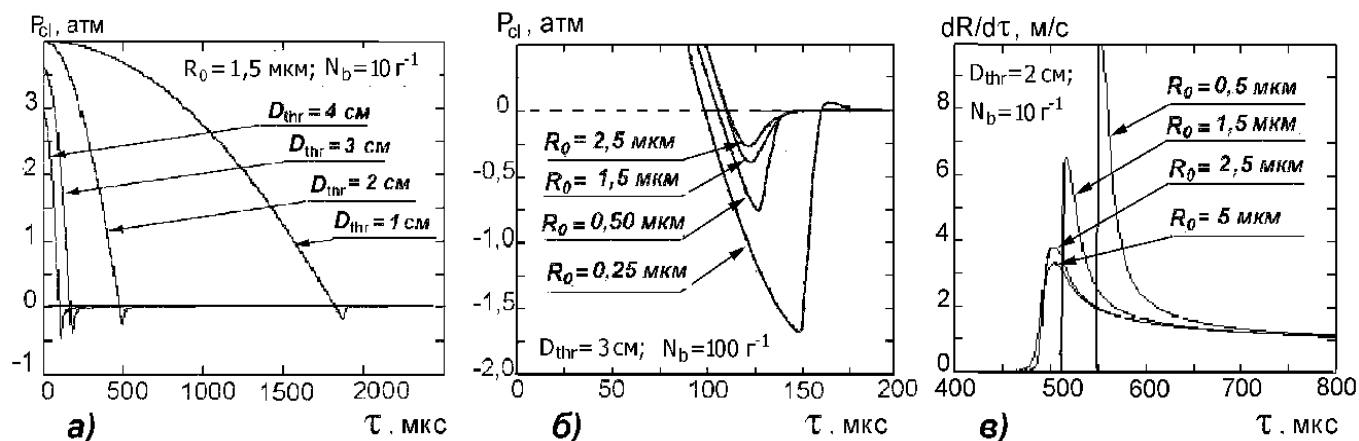


Рис. 4.9. Характер зміни тиску в рідині всередині кластера $p_{cl} = f(\tau)$ (а, б) та швидкості зростання радіусу бульбашок $dR/d\tau = f(\tau)$ (в) на початку розвитку бульбашкового ансамблю в залежності від режимних параметрів: d_1 , R_0 та N_b .

На рис. 4.9 а, б показано, що через швидке розширення активованих бульбашок тиск $p_{l\ cr}$ швидко наростає по асимптоті до граничного значення $p_{sat}(T_{l0})$ і тому не встигає знизитись до менших негативних значень ($p_{l\ cr} \propto -0,2 \div -0,5$ атм). За короткий час $\Delta\tau \propto 30 \div 40$ мкс тиск в кластері зростає до значення $p_{cl} = p_{sat}(T_{l0})$ тим швидше, ніж більші за розміром бульбашки (рис. 4.9 б).

Це перешкоджає активації бульбашок меншого розміру [7]. Протягом цього періоду відбувається різке збільшення та плавне зниження швидкості зростання бульбашок (рис. 4.9 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. Очевидно, що в міру стабільної рециркуляції рідини через сопло видалятимуться газові бульбашки все меншого розміру, але з високою концентрацією.

При скиданні зовнішнього тиску p_l до мінімального значення $p_{l\ min} < p_{l\ cr}$ тиск рідини в міжбульбашковому просторі кластера швидко зростає від $p_{cl} = p_{l\ cr}$ до $p_{cl} = p_{sat}(T_{l0})$ незалежно від подальшого зниження зовнішнього тиску $p_l(\tau)$. Кінетика зростання окремих бульбашок всередині кластера, що розширюється, буде визначатись вже не негативним зовнішнім тиском $p_l(\tau) < 0$ як для одиначної бульбашки, а тиском рідини в околиці бульбашки $p_{cl} \cong p_{sat}(T_{l0}) > 0$. Час

досягнення рівноважного тиску $p_{sat}(T_{l0})$ всередині кластера буде тим коротший, чим вища концентрація бульбашок N_b . Зі зменшення N_b швидкість росту бульбашок кластера зростає (рис. 4.10 а).

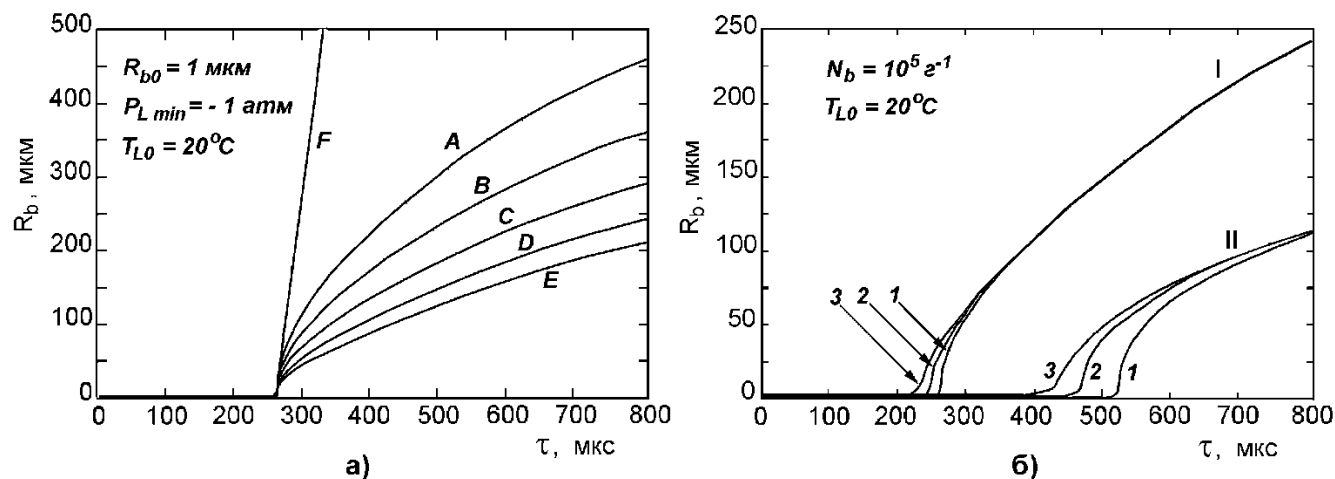


Рис. 4.10. Зміна з часом радіуса бульбашок монодисперсного кластера $R_b(\tau)$ при скиданні тиску від $p_{l0} = 1$ атм до $p_{l\ min}$: а) в залежності від концентрації бульбашок кластера N_b : А – 10^2 г $^{-1}$; В – 10^3 г $^{-1}$; С – 10^4 г $^{-1}$; D – 10^5 г $^{-1}$; Е – 10^6 г $^{-1}$; F – одинична бульбашка; б) в залежності від початкового розміру мікрозародків R_{b0} : 1 – 2,5 мкм; 2 – 1,5 мкм; 3 – 1,0 мкм при $p_{l\ min}$: I – -3 атм; II – -0,5 атм.

При скиданні тиску до заданого значення $p_{l\ min}$ бульбашки, незалежно від їхнього початкового радіуса, зростають до однакового розміру (4.10 б). Отже, до початку стиснення спочатку полідисперсного кластера діаметр всіх бульбашок у ньому буде однаковим. Парові бульбашки зростають тим інтенсивніше, чим нижче значення $p_{l\ min}$ (рис. 4.10 б).

Наведені на рис. 4.10 результати доводять суттєвий вплив початкового розміру бульбашок на швидкість стабілізації тиску в кластері до значення стадії активації цих бульбашок.

Однак, після стабілізації тиску значення R_0 не впливають на розвиток кавітаційного кластера. Незалежно від початкового радіуса, бульбашки швидко зростають до однакового розміру, що узгоджується з даними відеореєстрації [11, 48]. Найбільший вплив на еволюцію кластера створює концентрація бульбашок. Це підтверджують результати обчислювального експерименту, що наведені на

рис. 4.11. 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.

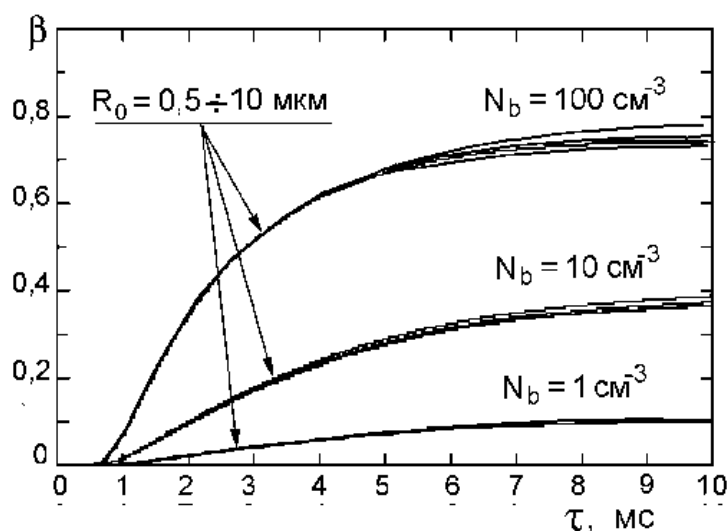


Рис. 4.11. Залежність поточного паровмісту води в процесі кавітаційного закипання рідини в соплі Вентурі від початкового розміру і концентрації газових зародків.

На рис. 4.12 *а, б* показано, як змінюється тиск 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 $p_{cl} = p_{sat}(T_{l0}) = const$, який точно реєструється за допомогою манометра. Саме цей тиск стаціонарного кипіння рідини більшість дослідників визначають як тиск початку кавітації [2, 19, 48, 58].

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 [166, 186, 290]. Конкуренція між швидкістю скидання зовнішнього тиску $p_l = f(\tau)$ та швидкістю наростання тиску всередині кластера $p_{cl} = f(\tau)$ визначає кількість активованих бульбашок.

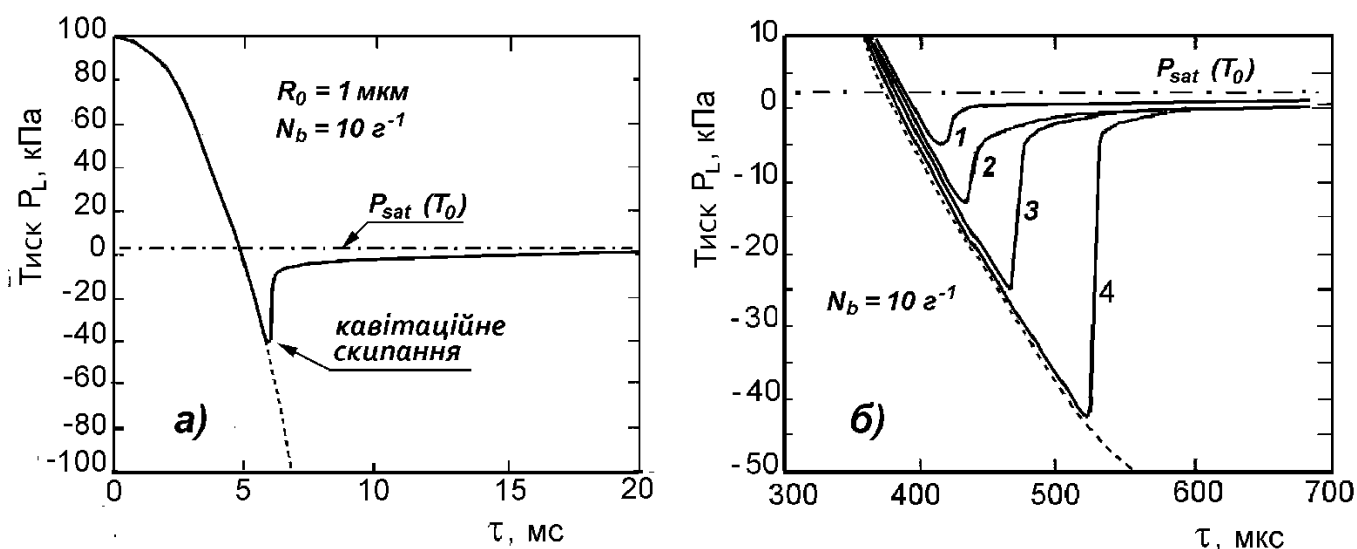


Рис. 4.12. Зміна з часом тиску p_{cl} всередині кластера (суцільна лінія) при скиданні тиску у воді p_l (пунктир) від $p_{l0} = 0,1 \text{ МПа}$ до $p_{l \min} = -1 \text{ МПа}$ при $N_b = 10 \text{ г}^{-1}$: **а** – ілюстрація відмінності між тиском кипіння $p_{sat}(T_{l0})$ та тиском закипання рідини $p_{l \text{ cr}}(R_0)$; **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.

Нехай вода в процесі обробки безперервно рециркулює через зону зниженого тиску кавітаційного пристрою (наприклад, сопло Вентурі). Очевидно, спочатку будуть зростати і видалятися з об'єму рідини найбільші активовані бульбашки і тільки потім почнуть активувуватись бульбашки меншого розміру. Слід відзначити, що вміст у рідині зародків бульбашок малого розміру істотно високий.

Результати, наведені на рис. 4.12 доводять визначальний вплив початкового розміру бульбашок на швидкість стабілізації тиску в кластері до значення $p_{sat}(T_{l0})$ на стадії активації. Однак, у процесі наступного стаціонарного кипіння води при $p_{cl} = p_{sat}(T_{l0}) = \text{const}$ значення R_0 не впливають на розвиток кавітаційного

кластера. Всі бульбашки, незалежно від їхнього рівноважного радіусу R_0 , швидко зростають до однакового розміру, що узгоджується з даними відеореєстрації [33, 277]. Найбільший вплив на еволюцію кластера в процесі кипіння має концентрація бульбашок N_b . Як показують розрахунки, зі збільшенням концентрації N_b швидкість пароутворення у воді в процесі закипання різко зростає.

В роботах [33, 34, 291, 294] показано, що при активації і швидкому зростанні великих бульбашок тиск p_{cl} в околиці бульбашок швидко зростає до значення $p_{cl} = p_{sat}(T_{l0})$, що перешкоджає активації бульбашок меншого розміру. Таким чином, існує конкуренція між швидкістю скидання зовнішнього тиску і швидкістю наростання тиску всередині кластера $p_{cl} = f(\tau)$.

4.5. Розрахунок параметрів роторно-пульсаційного апарата дослідного зразка установки кавітаційної дегазації рідини

4.5.1. Моделювання процесу зростання газопарових бульбашок в рідині

Для оцінки збільшення величини газовмісту в конденсаті при зростанні газопарових бульбашок внаслідок швидкого спадання тиску на виході з РПА було застосовано модель динаміки одиничні бульбашки (модельДОБ) і динаміки ансамблю бульбашок (модель ДБА). Для розрахунку динаміки парогазових бульбашок необхідно навести в аналітичному вигляді рівняння, яке адекватно описує характер зміни зовнішнього тиску внаслідок чого відбувається зростання або стиснення бульбашок. Це рівняння, специфічне для кожної окремої задачі, є базовим рівнянням обох моделей.

В даній задачі таке аналітичне рівняння повинно відображувати характер зміни тиску в рідині на вході в II ротор за період одного перекриття отворів РПА. Для цього в аналітичному вигляді наводили залежність $p_l = f(\tau)$, одержану з математичної моделі РПА. Ця залежність наведена в підрозділі 4.2.1 цієї роботи.

Було розглянуто еволюцію монодисперсного ансамблю бульбашок у воді при швидкій зміні тиску на межі між статором і II ротором. У всіх розрахунках початкова концентрація CO_2 у воді дорівнювала 70 мг/л ($7 \cdot 10^{-5}$ г/см³).

Досліджувались монодисперсні ансамблі за початковими значеннями радіусів бульбашок в інтервалі $R_{b0} = (0,5 \text{ мкм} \div 10 \text{ мкм})$. Для кожного значення R_{b0} по табл. 6.5 визначалась відповідна кількість бульбашок в 1 см^3 води, тобто параметр N_b .

Якщо початковий газовміст V_{b0} при будь-яких початкових радіусах R_{b0} не дуже високий (згідно табл. 6.5 він не перевищує 3%) то можна з достатньою точністю стверджувати, що початкова кількість бульбашок N_b в 1 см^3 води така ж сама, що й кількість бульбашок в 1 грамі H_2O . Оскільки в процесі зростання бульбашок при обробці в РПА кількість води вважається незмінною, то число N_b , визначене в г^{-1} у процесі зростання бульбашок залишається незмінним для кожного радіуса R_{b0} . Тому в моделі ансамблю бульбашок для кожного R_{b0} параметр $N_b = N_{b0} = \text{const}$.

4.5.2 Результати розрахунків

На рис. 4.13 наведені аналітичні залежності зміни радіусу бульбашок з часом $R_b = f(\tau)$ для кожного з ансамблів бульбашок для 8 значень початкового радіусу R_{b0} – від 0,6 мкм до 10 мкм при зміні зовнішнього тиску від 1 атм до -0,65 атм і наступному його зростанні до 0,2 атм, як це було показано на рис. 4.12.

З рис. 4.13 випливає, що при зниженні тиску розмір бульбашок протягом відносно довгого часу майже не змінюється. Швидке збільшення радіусу бульбашок починається лише тоді, коли сумарний зовнішній і капілярний тиск $p_{ext} + 2\sigma / R_{b2}$ стане меншим, ніж внутрішній тиск парогазової фази всередині бульбашки $p_{gb} + p_{sat}(T_l)$. Оскільки дія капілярного тиску $2\sigma / R_{b2}$ на бульбашки малого розміру вища, ніж на великі то зростання бульбашок з малими радіусами починається пізніше. Бульбашки з початковим радіусом $R_{b0} = 0,6 \text{ мкм}$ (крива 1) взагалі не зростають при падінні зовнішнього тиску, який навіть при мінімальних від'ємних значення компенсує дію капілярних сил.

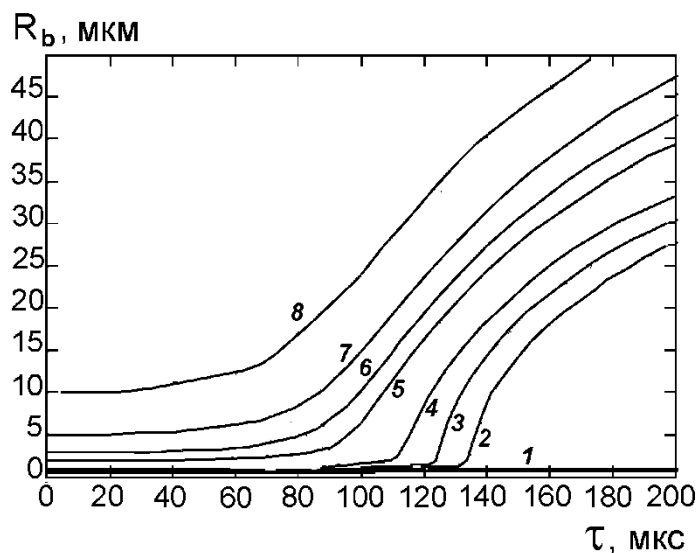


Рис. 4.13. Зміна з часом радіуса газових бульбашок в каналах зовнішнього ротора для монодисперсної сукупності бульбашок діоксиду вуглецю у воді при різних значеннях початкового радіуса R_{b0} : 1 – 0,6 мкм; 2 – 0,7 мкм; 3 – 0,8 мкм; 4 – 1,0 мкм; 5 – 2,0 мкм; 6 – 3,0 мкм; 7 – 5,0 мкм; 8 – 10,0 мкм при $m_{g0} = 70$ мг/л і $T_l = 25^\circ\text{C}$. Розрахунок проведено за рівняннями математичної моделі динаміки ансамблю парогазових бульбашок з урахуванням зміни тиску в каналах РПА, розрахованої по моделі.

При зростанні сукупності бульбашок вони стикаються між собою і утворюють щільну упаковку. Подальше зростання об'єму газової фази бульбашок веде до утворення динамічної пінної структури, що врешті призводить до інверсії фаз завдяки коагуляції контактуючих бульбашок. За надзвичайно короткий час дисперсна система “бульбашки – рідина” перетворюється в дисперсну систему “краплі – парогазова фаза”. Явище інверсії становить неабиякий інтерес для вчених та спеціалістів в різних галузях і знайшло відображення у великій кількості наукових публікацій [53, 125, 272, 200]. Але завдяки стохастичній природі цього процесу і впливу на нього багатьох факторів застосування методів математичного моделювання для вивчення процесу інверсії поки-що не дало позитивних результатів. При зростанні сферичних бульбашок в рідині щільна упаковка утворюється, коли відношення об'єму газової фази до об'єму системи досягає приблизно 0,65. Це відповідає щільній упаковці твердих куль в заданому об'ємі.

Очевидно, стосовно даної задачі, значення $\beta_{inv} = V_{b\ max} = 0,65$ має відповідати критичному значенню газовмісту, при перевищенні якого відбувається безповоротна коагуляція бульбашок і наступна інверсія фаз. В цьому рівнянні параметр V_b – це об'єм парогазових бульбашок в одиниці об'єму двофазної парорідинної системи, а $\beta = V_b$, відповідно, характеризує величину поточного газовмісту ($\text{см}^3/\text{см}^3 \text{H}_2\text{O}$). В рамках математичної моделі динаміки ансамблю бульбашок було проведено аналітичне дослідження еволюції сукупності парогазових бульбашок до моменту досягнення критичної величини газовмісту.

На рис. 4.14 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 при тих же параметрах, що й на рис. 4.13.

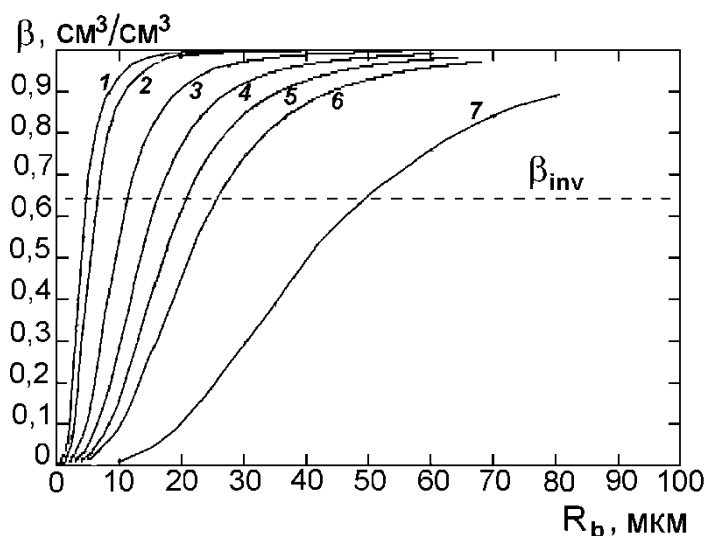


Рис. 4.14. Залежність величини газовмісту $\beta = V_g / V_{H_2O}$ монодисперсної сукупності бульбашок діоксиду вуглецю у воді від поточного радіуса бульбашок $R_b(\tau)$ при різних значеннях початкових радіусів R_{b0} : 1 – 0,7 мкм; 2 – 1 мкм; 3 – 2 мкм; 4 – 3 мкм; 5 – 4 мкм; 6 – 5,0 мкм; 7 – 10,0 мкм при $m_{g0} = 70 \text{ мг/л}$ і $T_l = 25^\circ\text{C}$. Пунктирною лінією показано значення газовмісту $\beta = 0,65$, при якому відбувається інверсія структури: перехід від рідинно-бульбашкової до газо-крапельної.

Пунктирною лінією показано значення критичного газовмісту $\beta_{inv} = 0,65$. 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 β бульбашок вже не існує внаслідок інверсії фаз.

На рис. 4.15 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 β_{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.

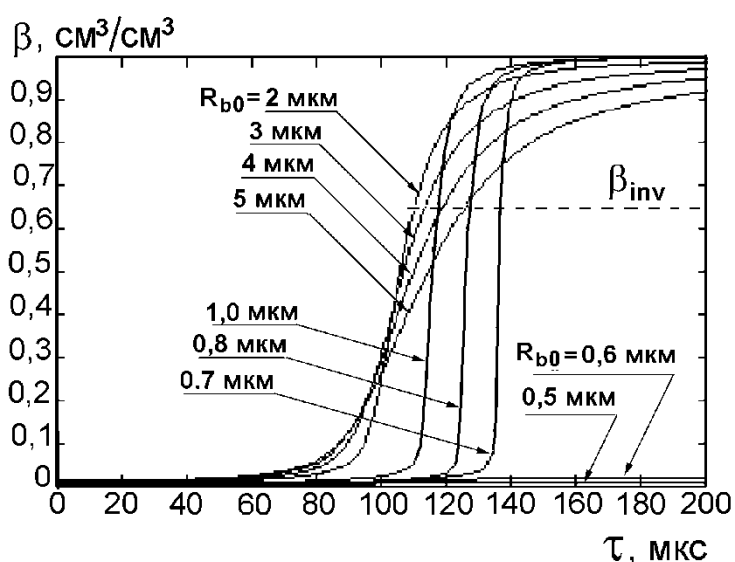


Рис. 4.15. Зміна з часом величини газовмісту $\beta = V_g / V_{H_2O}$ монодисперсної сукупності бульбашок діоксиду вуглецю у воді при різних значеннях початкових радіусів R_{b0} ($m_{g0} = 70$ мг/л; $T_l = 25^\circ\text{C}$).

4.5.3 Аналіз результатів аналітичного дослідження

Для проведення детального аналітичного дослідження стосовно шляхів зменшення кількості нерозчиненого агресивного діоксиду вуглецю в конденсаті необхідно за допомогою розроблених математичних моделей і створених на їх основі комп'ютерних програм мати дані про початковий розподіл бульбашок CO_2 в конденсаті за розміром. Для цього треба провести відповідні експериментальні дослідження з застосуванням сучасних вимірювальних приладів або провести багатофакторні розрахунки для можливих мод розподілення бульбашок по розміру і на цій основі проаналізувати експериментальні дані по кінетиці абсорбції вуглекислого газу з конденсату.

В той же час проведені аналітичні дослідження дозволяють зробити певні висновки стосовно вилучення нерозчиненого діоксиду вуглецю з конденсату.

1. Дослідження показали, що в конденсаті після його тривалого перебування в контакті з атмосферним повітрям не можуть перебувати газові бульбашки великих розмірів з $R_{b0} > 5$ мкм. Нерозчинений діоксид вуглецю перебуває у воді в доволі великій кількості ($\propto 70$ мг/л) у вигляді мікробульбашок або нанорозмірних бабстоунів. Як показали наведені вище результати дослідження, бульбашки таких розмірів не можуть зростати навіть при великих перепадах тисків, які створюються на виході з РПА. В той же час обробка конденсату не може також призводити до подальшого подрібнення мікробульбашок. Але існує інша можливість впливу гідродинамічних процесів в РПА на парогазові бульбашки.

В процесі проходження гетерогенної рідини через канали РПА всередині апарата ініціюється низка потужних механізмів, внаслідок яких відбувається сильна динамічна дія на дисперсії. У вузьких зазорах між роторами і статором, завдяки малій ширині зазору $\delta = 500$ мкм і великій тангенціальній швидкості обертання ротора ($v = \omega R \approx 25$ м/с), зсувні швидкості досягають дуже високих значень – порядку

$2,5 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$. Дія зсувних напружень в зазорах РПА може призвести до деформації і руйнування навіть твердих дисперсій. Періодичні високочастотні зміни тиску та

аномально високі зміни прискорень по напрямку і по величині також сприяють інтенсивному деформуванню і роздрібненню дисперсій. Окрім того, при періодичному перекритті отворів в каналах ротора і статора виникають потужні короточасні мікровихори, що веде до інтенсивного перемішування рідини в каналах. Внаслідок сукупної дії цих факторів – високочастотних гальмувань і прискорень рідини, вихроутворення, інтенсивного перемішування тощо можливе зіткнення бульбашок, їх коагуляція і формування бульбашок більш великих розмірів або бульбашкових асоціацій. Тоді великі бульбашки формуються вже під час проходження конденсату через канали РПА.

2. В полідисперсних сукупностях бульбашок при швидкому зменшенні зовнішнього тиску спочатку починають зростати більш крупні бульбашки. Під час їх зростання в міжбульбашковому просторі рідини тиск збільшується у порівнянні з поточним зовнішнім тиском $p_{ext}(\tau)$, що перешкоджає зростанню менших за розміром бульбашок. Це явище впливає з моделі динаміки бульбашкових ансамблів і враховується в комп'ютерних програмах, а також підтверджується даними інших дослідників [467–469]. Тому після інверсії фаз парогазова фаза утворюється переважно з великих бульбашок, а мікробульбашки та бабстоуни залишаються всередині утворених краплин з тим же розміром.

3. Існуючі експериментальні дані про процеси піноутворення та інверсію фаз свідчать про те, що розмір утворених крапель тим більший, чим більший розмір сферичних бульбашок при їх щільній упаковці на момент досягнення критичного газовмісту β_{inv} . З цієї точки зору є важливим наявність в конденсаті більшої кількості саме порівняно великих бульбашок. По-перше, в процесі інверсії фаз, як показали проведені дослідження, найбільший об'єм парогазової суміші, яка потім вилучається з вакуумної камери за допомогою вакуумного насоса, утворюють саме бульбашки великого розміру. По-друге, при розпиленні конденсату з виходу РПА у вакуумній камері бажано одержати порівняно великі краплини, які не виносяться разом з газовим потоком, що відкачується вакуумним насосом, і окрім того, швидше повертаються в об'єм рідини на подальшу обробку в РПА. Розрахунки показали, що

десорбція CO_2 з поверхні краплин конденсату за час перебування їх у вакуумній камері відбувається значно швидше у порівнянні зі швидкістю його виділення з об'єму конденсату. Саме в цьому полягає перевага і перспективність запропонованого методу нейтралізації.

4.6. Висновки до розділу 4

1. Для ефективного застосування сопла Вентурі як кавітаційного реактора необхідно підібрати оптимальні параметри кутів розкриття конфузора та дифузора, а також оптимальну довжину горловини сопла відповідно до задачі даного дослідження. При заданому діаметрі трубопроводу рециркуляційної лінії лабораторного стенда (діаметр каналу на вході та виході з сопла) ці параметри однозначно визначають геометрію та розміри сопла.

2. Вхідними змінними параметрами моделі є лише дві величини – тиск на виході з відцентрового насоса і діаметр горловини сопла. Тиск у вакуумній камері потрібно підтримувати на мінімальному значенні, виходячи з технічних можливостей застосованого вакуумного насоса.

3. Для ефективної роботи сопла Вентурі необхідно забезпечити гранично високу швидкість зниження тиску рідини в горловині до мінімальних негативних значень і, таким чином, ініціювати зростання найменших газових зародків.

4. Проведені обчислювальні експерименти по вивченню руйнування газових дисперсій під дією зсувних напружень в міжциліндрових зазорах РПА 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.

5. Розроблено алгоритм розрахунку об'ємної концентрації газових зародків у воді та початкового газовмісту води, який входить в якості субмоделі застосованих гідродинамічних кавітаційних реакторів (сопла Вентурі та РПА) і може застосовуватися для будь якої рідини. Для цього необхідно для даної рідини мати

попередньо визначені достовірні експериментальні дані стосовно густини об'ємної концентрації зародків заданого фракційного складу.

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

РОЗДІЛ 5

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ДЕГАЗАЦІЇ РІДИНИ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ГІДРОДИНАМІЧНИХ КАВІТАЦІЙНИХ РЕАКТОРІВ НА БАЗІ СОПЛА ВЕНТУРІ ТА РПА

5.1. Опис експериментальної бази та методики проведення досліджень

Для проведення досліджень по кавітаційній дегазації та деарації рідин, зокрема води створено дослідний стенд. Як кавітаційний реактор застосовували сопла Вентурі різної геометрії та РПА типу ротор-статор-ротор, технічні характеристики якого наведені в табл. 3.1.

Метод кавітаційної дегазації рідин, який використовується на даній лабораторній установці базується на наступних засадах. Відомо, що присутні в рідині гази знаходяться як в розчиненому, так і у вільному стані. Вільні гази перебувають у складі мікробульбашок. У відстояній воді концентрація газових бульбашок з $d \propto 1 \div 10$ мкм знаходиться в інтервалі $10^2 \div 10^4$ см⁻³. Зокрема, кількість вільного СО₂ в бульбашках на порядок перевищує його вміст у воді в розчиненому стані. Дослідження проведено з метою обґрунтування раціональної геометрії кавітаційного реактора і оптимальних режимів дегазації рідини стосовно вирішення конкретних технологічних завдань.

Схеми стендів для кавітаційної дегазації рідини на базі сопла Вентурі і РПА наведено на рис. 5.1 а, б.

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 мікро-бульбашок CO_2 внаслідок збільшення їх розмірів в соплі з можливістю реалізації явища інверсії структури потоку, тобто перетворення потоку з бульбашково-рідинної структури в краплинно-газову. Пара рідини разом з домішками газу відводиться з камери за допомогою вакуумного насоса. Рідина зі зменшеним вмістом газу збирається в нижній частині камери і далі під дією відцентрового насоса знову рециркулює через кавітатор.

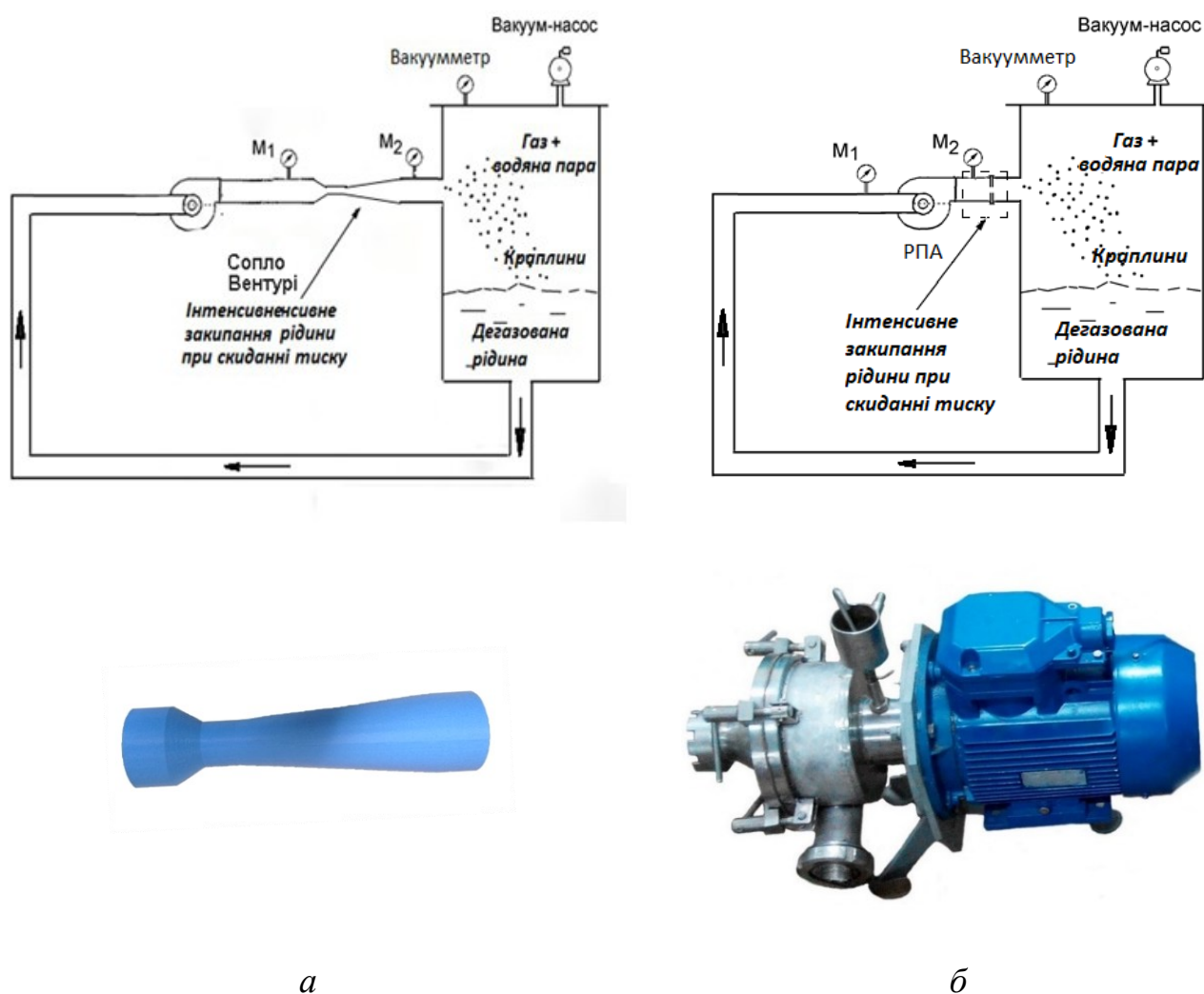


Рис. 5.1. Схеми стендів для кавітаційної дегазації рідини з кавітаційними реакторами: *а* – на базі сопла Вентурі; *б* – на базі РПА.

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») де, 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.

Як і в попередній схемі на базі сопла Вентурі як кавітаційного реактора, дегазація рідини досягається шляхом вилучення мікробульбашок CO_2 внаслідок збільшення їх розмірів в соплі з можливістю реалізації явища інверсії структури потоку (перетворення потоку з бульбашково-рідинної структури в краплинно-газову). Пара рідини разом з домішками газу відводиться з камери за допомогою вакуумного насоса. Рідина зі зменшеним вмістом газу збирається в нижній частині камери і далі під дією відцентрового насоса знову рециркулює через кавітатор.

5.2. Визначення зміни величини газовмісту, водневого показника і температури рідини від тривалості її обробки з використанням сопла Вентурі як кавітаційного реактора

Дослідження проводили на лабораторному стенді оснащеному соплом Вентурі, що виконувало функції кавітаційного реактора (рис. 5.1 а). Більш детальна принципова схема лабораторного стенда наведена на рис. 5.2.

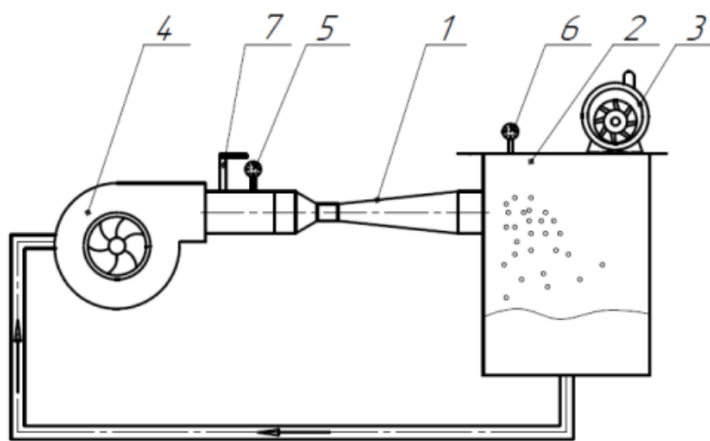


Рис. 5.2. Схема лабораторної установки для дегазації рідини на базі сопла Вентурі: 1 – трубка Вентурі; 2 – вакуумна камера; 3 – вакуумний насос; 4 – відцентровий насос; 5 – манометр; 6 – вакуумметр; 7 – клапан регулювання подачі рідини.

Циркуляційний контур включає в себе резервуар з оброблюваною рідиною, трубопроводи, відцентровий насос, сопло Вентурі, а також вимірювальні прилади (манометри, термометр і витратомір).

Трубка Вентурі безпосередньо з'єднана з вакуумною камерою 2, в якій вакуумним насосом 3 створювали тиск нижче атмосферного і забезпечували видалення розчинених газів. Значення тиску в камері контролювали вакуумметром 6. Подачу рідини здійснювали за допомогою відцентрового насоса 4, продуктивність подачі регулювали вентилем 7. Контролю тиску в системі здійснювали за допомогою манометра 5, встановленому перед трубкою Вентурі.

Використовуючи теоретичний підхід на базі математичного моделювання для вибору раціональної конфігурації кавітаційного реактора, наведеного в розділах 2 і 4 була підібрана оптимальна геометрія сопла Вентурі, що забезпечує високу ефективність кавітаційного впливу при найменших енерговитратах при проходженні рідини через сопло [202, 386, 464].

Діаметр поперечного перерізу труби D_0 був однаковим на вхідному і на вихідному патрубках і дорівнював 40 мм. Діаметр горловини сопла D_{thr} дорівнював 16 мм, довжина горловини сопла L_{thr} дорівнювала 20 мм. Кут збіжності конфузора β_{con} становив 60° , а кут розбіжності дифузора β_{dif} – 12° .

Як робоче середовище використовували модельна 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, параметри яких наведено в табл. 5.1. Значення експериментальних даних та концентрації вуглекислого газу з перерахунку одиниць рН у зразках наведено в табл. 5.2.

Таблиця 5.1. 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 5.2. 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, °C	21,8	22,1	22,3	22,5	21,3	23,9	24,4	25,2

5.3. Визначення зміни величини газовмісту, водневого показника і температури рідини від тривалості її обробки з використанням РПА як кавітаційного реактора

Дослідження проводили на лабораторному стенді оснащеному РПА типу «ротор-статор-ротор» з міжциліндровим зазором 500 мкм і частотою обертання роторів 3000 об/хв, який виконував функції кавітаційного реактора (рис. 5.1 б). Основні технічні характеристики РПА наведені в табл. 3.1.

Метою дослідження було визначення оптимальної тривалості обробки рідини для досягнення необхідного ступеня її дегазації. Задачею дослідження було визначення динаміки зміни вмісту розчиненої вугільної кислоти залежно від тривалості гідродинамічної обробки рідини.

Для визначення оптимальної тривалості обробки рідини здійснювали обробку двох рідин – конденсату продуктів згоряння природного газу і модельної рідини (розчину діоксиду вуглецю в дистильованій воді), що близька за фізико-хімічними показниками до конденсату, до досягнення стабільного значення водневого показника.

Конденсат продуктів згоряння природного газу отримували в районній котельній м. Києва. Модельну рідину готували шляхом насичення свіжоприготовленої дистильованої води вугільною кислотою шляхом додавання діоксиду вуглецю в твердому агрегатному стані не створюючи при цьому надлишкового тиску над поверхнею рідини і витримували протягом однієї доби.

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. Відібрані під час досліджень зразки води і конденсату зберігали протягом п'яти діб в негерметично закритих поліпропіленових ємностях (одноразові стакани) без доступу прямого сонячного світла при температурі приблизно 15°C.

Для вимірювання величини водневого показника зразків рідини використовували багатофункціональний прилад COnDO EZODO PCT-407 для аналізу параметрів води (точність вимірювання по pH $\pm 0,01 + 1$ цифра).

Зміну концентрації розчиненої вугільної кислоти визначали користуючись розрахованими значеннями pH водного розчину вугільної кислоти від її

концентрації [465, 466]. Для зручності розрахунків було здійснено апроксимацію і отримано експоненціальну залежність

$$C_{H_2CO_3} = 889673e^{-4,386pH}, \quad (5.1)$$

де pH – водневий показник розчину, од. рН; $C_{H_2CO_3}$ – концентрація вугільної кислоти, моль/л.

Коефіцієнт детермінації отриманої залежності становить 0,9999 в діапазоні значень рН=3,7÷6,3.

В таблицях 5.3 і 5.4 наведені отримані результати вимірювання рН і обчислення концентрації вугільної кислоти в конденсаті продуктів згоряння природного газу і модельній рідині від тривалості їх обробки.

Таблиця 5.3. 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 5.4. 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

5.4. Аналіз отриманих результатів

Розглянемо результати експерименту, що наведені в підрозділі 4.2. Відомо, що кавітація впливає на зміну значення рН розчинів, що пов'язано з видаленням вуглекислого газу, а також порушенням рівноваги в розчині за рахунок зміни балансу між вугільною кислотою, гідрокарбонат-іонами, карбонат-іонами і вуглекислим газом, що міститься в рідині як у вигляді бульбашок так і у вигляді розчиненого вуглекислого газу. Залежно від режиму обробки зміна рН становила 0,45 од. і 1,06 од. відповідно для першого та другого режимів обробки протягом 6 хв обробки. Найбільш значну зміну рН розчину в часі для першого режиму обробки, що становила 0,4 одиниці, спостерігали після чотирьох хвилин обробки. У той же час для другого режиму обробки різниця рН після двох хвилин обробки становила 0,66 одиниці. Показник рН кінцевих проб свідчить про більшу ефективність дегазації при другому режимі обробки. Зміна концентрації вуглекислого газу в модельній рідині становила 961,1 мг/л та 1092,1 мг/л за 6 хв обробки відповідно для першого та другого режимів обробки. Згідно отриманих даних ефективність

дегазації становить 99,2 % для другого режиму обробки, і 87,3 % для першого. Така різниця в ефективності дегазації, очевидно, пояснюється гідродинамічними параметрами режимів обробки.

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 було визначено зміну тиску в трубці (рис. 5.3). Як видно з рисунка, 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.

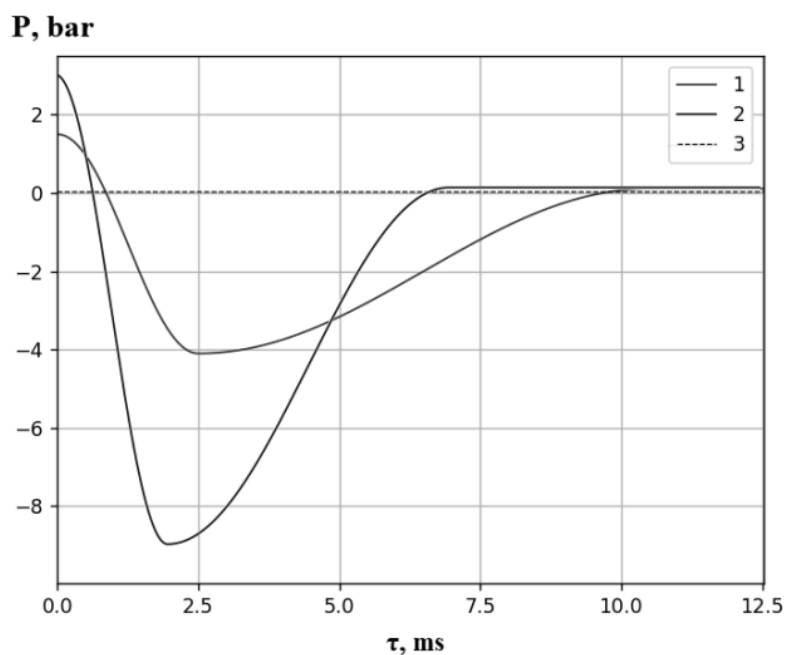


Рис. 5.3. Залежність зміни тиску в трубці Вентурі від часу: 1 – перший режим обробки; 2 – другий режим обробки; 3 – тиск насичення.

Отримані криві тиску дозволили визначити поведінку газової бульбашки. Для цього була використана модель одиничної бульбашки [283]. Ця модель базується на розв'язанні модифікованого рівняння Релея–Плесета. Умови еволюції бульбашки вважали ізотермічними, що допустимо на стадії росту бульбашки, яка становить

найбільший інтерес у цьому дослідженні. Так як бульбашки радіусом, що не перевищує 5 мкм вважаються стабільними в рідині, на графіку наведені результати для цього діапазону їх розмірів.

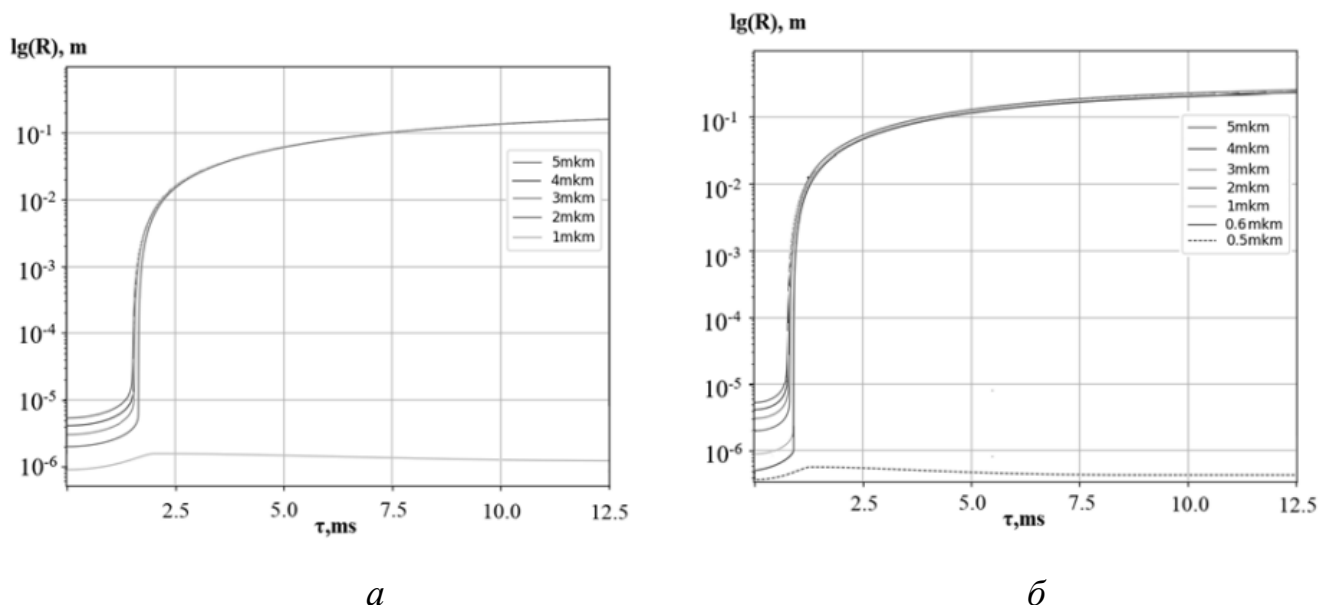


Рис. 5.4. Залежність зміни радіуса бульбашок з часом від їх початкового розміру: *а* – при режимних параметрах першого режиму обробки; *б* – при режимних параметрах другого режиму обробки.

У рамках дегазації рідини фізичними методами необхідно вирішувати задачу різкого скидання тиску до значень, достатніх для активації і зростання бульбашок, створення плівкового потоку, а також подальшого відведення неконденсованих газів. Результати розрахунку показують, що перший режим обробки дозволяє активувати бульбашки радіусом 2 мкм і більше, тоді як другий режим дозволяє активувати бульбашки від 0,6 мкм, що є гарантією видалення більшого об'єму газу. Тут слід зазначити, що модель динаміки одиночної бульбашки не враховує умови взаємного впливу при зростанні бульбашок і зміну тиску в кавітаційному кластері. Однак, ці результати показують, що швидкість активації вища для бульбашок більшого розміру, тому можна припустити, що газ з великих бульбашках буде вилучатись спочатку, а газ з менших бульбашок буде вилучатись в міру видалення більшої фракції бульбашок. Граничною умовою для видалення розчинених газів

буде найбільший негативний тиск, якого можна досягти для активації бульбашок мінімального розміру.

У літературі [1] є дані про кількість бульбашок N_b розподілених у рідині залежно від їх початкового розміру (рис. 5.5, крива 1). На основі цих даних була побудована крива 2, що визначає залежність питомого об'єму газу, зайнятого бульбашками, від їх радіуса. Вилучення з рідини бульбашок відносно великого розміру дозволяє видалити більшу частину розчинених газів. Наявність бульбашок розміром до 1,5 мкм істотно не впливає на вміст розчинених газів, так як вони становлять незначну частину від загального об'єму газу в рідині. Інтегрування даних кривої 2 дозволило встановити об'єм розчинених газів у бульбашках в елементах радіусом від 0,5 до 5 мкм та об'єм видалених газів за умов першого та другого режимів обробки, а також порівняти орієнтовну ефективність режимів процесу дегазації. Отримані результати наведені в таблиці 5.5.

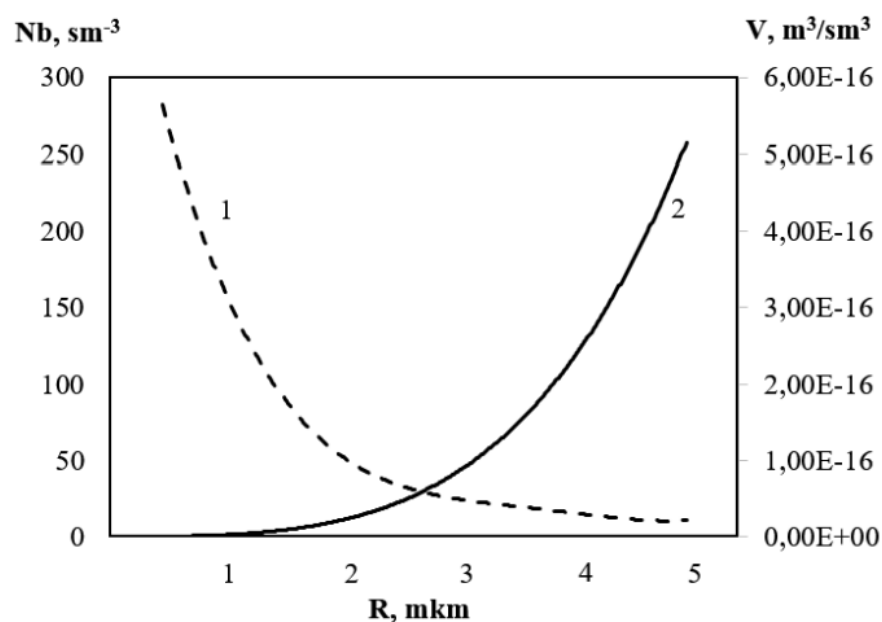


Рис. 5.5. Розподіл кількості бульбашок газу за розміром (крива 1) та їх об'ємом (крива 2), що містяться у відстояній водопровідній воді.

Як видно з таблиці 5.5, теоретична ефективність дегазації методом гідродинамічної кавітації має досить високу потенційну ефективність. Оцінки можливого видалення газу є теоретичними розрахунками. Згідно з даними [29, 166,

179], на практиці високі значення негативного тиску можуть бути досягнуті у воді, вільній від домішок, які автори цих робіт вважають розчиненими газами. Однак поступове видалення бульбашок розчинених газів дозволяє скинути мінімальний тиск до більш низьких значень, а це означає, що з кожним новим циклом рециркуляції рідини в гідродинамічному кавітаційному дегазаторі можливе видалення фракції з меншими бульбашками.

Таблиця 5.5. Питомий об'єм розчинених газів у рідині в залежності від режимів обробки

Зразок відібраної рідини	Питомий об'єм розчинених газів у модельній рідині, $\text{мкм}^3/\text{см}^3$	Ефективність дегазації, %
Перед обробкою	$6,5410 \cdot 10^{-4}$	—
Після обробки (І режим)	$0,1667 \cdot 10^{-4}$	97,5
Після обробки (ІІ режим)	$0,0007 \cdot 10^{-4}$	99,9

Експериментальні дані щодо рН модельної рідини та розрахована на їх основі ефективність дегазації дещо відрізняються від теоретичних розрахунків цього показника при обробці рідини методом гідродинамічної кавітації. Після коригування даних оцінки ефективності дегазації за рН та концентрацією вуглекислого газу 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 ефективності дегазації становить 87,3% і 99,2% відповідно.

Розглянемо результати експерименту, що наведені в підрозділі 5.3. Оскільки 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%) то можна вважати, що утворений конденсат за хімічним складом близький до дистильованої води, насиченої діоксидом вуглецю так як розчинність азоту у воді нижча приблизно в $65 \div 70$ разів.

Розглядаючи детально процес утворення конденсату продуктів згоряння природного газу і причину рівноваги системи «вода – вугільна кислота» при концентрації вугільної кислоти значно вищої за рівноважну 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.

Отримані результати вказують на те, що перебіг процесу дегазації конденсату продуктів згоряння природного газу близький до процесу дегазації модельної рідини. Дещо нижче значення рН конденсату може бути зумовлене можливою присутністю незначної кількості оксидів азоту, що можуть утворюватись під час згоряння природного газу або неповним вилученням вугільної кислоти через наявність в конденсаті стабільних бульбашок меншого розміру, ніж в модельній рідині, що зумовлено відмінностями в перебігу процесу насичення рідини діоксидом вуглецю.

При аналізі отриманих даних встановлено, що основна зміна величини рН модельної рідини і конденсату продуктів згоряння природного газу відбувається приблизно протягом перших двох 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 вказує на те, що протягом перших двох хвилин обробки відбувається вилучення основної кількості вугільної кислоти. Зростання рН і, відповідно, зниження вмісту розчиненої вугільної кислоти обох рідин протягом кількох діб можна пояснити перебігом процесу релаксації під час якого відбувається спливання з рідини мікробульбашок діоксиду вуглецю, що не встигли покинути рідину при обробці і встановлення нової рівноваги системи «вода – вугільна кислота».

Нейтралізація конденсату продуктів згоряння природного газу запропонованим способом досягається за рахунок вилучення стабільно існуючих при нормальних умовах бульбашок діоксиду вуглецю внаслідок збільшення їх розмірів з можливістю реалізації явища інверсії структури потоку, тобто

перетворення потоку з бульбашко-рідинної структури в крапельно-газову. 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. Одночасно при цьому відбувається розпад вугільної кислоти внаслідок порушення вуглекислотної рівноваги і вилучення інших газів з конденсату.

На базі моделей ДОБ і ДБА проведено чисельне моделювання процесу зростання газопарових бульбашок в конденсаті. Також, користуючись математичною моделлю динаміки ансамблю бульбашок, проведено аналітичне дослідження еволюції сукупності парогазових бульбашок до моменту досягнення критичної величини газовмісту. Критичне значення газовмісту, при перевищенні якого відбувається безповоротна коагуляція бульбашок і наступна інверсія фаз становить близько 0,65, що відповідає щільній упаковці сферичних куль.

Аналізуючи зміну величини газовмісту в залежності від радіусу зростаючих бульбашок в монодисперсному ансамблі з початковими значеннями радіусів в інтервалі від 0,7 мкм до 10 мкм при початковій концентрації діоксиду вуглецю 70 мг/л і температурі рідини 25°C встановлено, що для всіх значень початкових радіусів радіуси бульбашок при досягненні критичного газовмісту збільшуються приблизно в п'ять разів, тобто об'єм бульбашкової фази зростає більш ніж на два порядки. Отримані результати публіковані в роботі [357].

Розрахунок залежності величини газовмісту від часу зростання бульбашок для монодисперсних бульбашкових ансамблів з початковими радіусами в інтервалі від 0,5 мкм до 5 мкм при початковій концентрації діоксиду вуглецю 70 мг/л і температурі рідини 25°C показав, що бульбашки малого розміру з початковим радіусом до 0,6 мкм загалі не зростають при даному режимі роботи апарата. Характерним є те, що бульбашки всіх початкових розмірів від 0,7 до 5 мкм досягають критичного значення газовмісту практично за однаковий проміжок часу (115÷140 мкс) з моменту спадання зовнішнього тиску, а наростання газовмісту в

сукупності бульбашок з відносно великими бульбашками з початковим радіусом понад 2 мкм відбувається повільно, тоді як для сукупності малих бульбашок з початковим радіусом до 1 мкм газовміст зростає майже миттєво.

Теоретичні дослідження також показали, що бульбашки малого розміру з початковим радіусом до 0,6 мкм загалі не можуть зростати навіть при великих перепадах тисків, що зініціюються при обробці конденсату продуктів згоряння природного газу запропонованим способом. Також даний спосіб обробки не може призводити до подальшого подрібнення мікробульбашок. Однак при проходженні рідинно-бульбашкового потоку через гідродинамічний кавітаційний реактор (на базі РПА) ініціюється низка потужних механізмів, внаслідок яких відбувається сильна динамічна дія на потік рідини: дуже високі напруження і швидкості зсуву (порядку $2,5 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$), періодичні високочастотні зміни тиску та аномально високі зміни прискорень як по напрямку так і по величині, короточасні мікрровихори тощо. Внаслідок сукупної дії цих факторів – високочастотних гальмувань і прискорень рідини, вихроутворення, інтенсивного перемішування тощо можливе зіткнення бульбашок, їх коагуляція і формування бульбашок більш великих розмірів або бульбашкових асоціацій [48, 129, 317]. Тоді великі бульбашки формуються вже під час проходження конденсату через гідродинамічний кавітаційний реактор.

Проведені розрахунки також показали, що швидкість десорбції діоксиду вуглецю з поверхні краплин конденсату за час перебування їх на стадії вилучення газу дуже мала у порівнянні зі швидкістю виділення з конденсату нерозчиненої вільної вуглекислоти. Саме в цьому полягає перевага і перспективність запропонованого методу нейтралізації.

5.5. Висновки до розділу 5

1. Результати проведеного дослідження зміни газовмісту модельної рідини (розчину діоксиду вуглецю в дистильованій воді) від тривалості її обробки при двох режимах ведення процесу з використанням сопла Вентурі як кавітаційного реактора показали, що вищий тиск на вході в сопло підвищує ефективність дегазації, яка

становить 87,3 % для першого ($p_0 = 0,15$ МПа) і 99,2 % для другого режиму обробки ($p_0 = 0,30$ МПа).

2. Нижчий тиск на вході в сопло Вентурі призводить до нижчого значення мінімального тиску і більш плавного його спадання / зростання. 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.

3. Встановлено, що швидкість активації вища для бульбашок більшого розміру. Граничною умовою для видалення розчинених газів буде найбільший негативний тиск, якого можна досягти для активації бульбашок мінімального розміру.

4. Визначено динаміку зміни вмісту розчиненої вугільної кислоти залежно від тривалості гідродинамічної обробки рідини. Встановлено, що протягом двох хвилин обробки вилучається основна кількість вугільної кислоти, – як з модельної рідини, так і з конденсату продуктів згоряння природного газу.

5. Забезпечивши досягнення критичного газовмісту рідини 0,65, при перевищенні якого відбувається безповоротна коагуляція бульбашок і наступна інверсія фаз можна досягнути максимальної ефективності перебігу процесу.

6. Швидкість десорбції діоксиду вуглецю з поверхні краплин конденсату за час перебування їх на стадії вилучення газу дуже мала у порівнянні зі швидкістю виділення з конденсату нерозчиненої вільної вуглекислоти в чому полягає перевага і перспективність запропонованого способу нейтралізації.

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

РОЗДІЛ 6

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ НЕЙТРАЛІЗАЦІЇ КИСЛОГО КОНДЕНСАТУ ПРОДУКТІВ ЗГОРЯННЯ ПРИРОДНОГО ГАЗУ

В промисловості і комунальному господарстві України експлуатується понад 100 тис. котлів, які працюють на природному газі. З них понад 30 тис. котлів доцільно експлуатувати в режимі глибокої утилізації теплоти димових газів. Особливістю цього режиму є те, що димові гази охолоджуються до температури нижче точки роси, що супроводжується частковою конденсацією водяної пари [294].

6.1. Аналіз механізму утворення кислого конденсату продуктів згоряння природного газу

При перебігу реакції окислення метану утворюються вода і діоксид вуглецю тому димові гази на виході з котла містять в основному вуглекислий газ, водяну пару, азот і незначні домішки інших газів. В табл. 6.1 наведений типовий компонентний склад димових газів, що утворюються при згорянні метану.

Таблиця 6.1. Типовий компонентний склад димових газів, % об.

Компонент димових газів, % об.	Вміст, % об.
Азот N ₂	72,11
Водяна пара	17,43
Вуглекислий газ CO ₂	8,72
Кисень O ₂	1,74
Оксид вуглецю CO	0,008...0,01
Оксиди азоту (NO _x)	0,005...0,01

Згідно балансу реакції горіння для спалюванні 1 м³ метану потрібно 2 м³ кисню або 10 м³ повітря. При цьому продукти реакції будуть мати приблизно наступний склад: 1 м³ діоксиду вуглецю, 2 м³ парів води, 8 м³ азоту і домішки інших газів, що містяться в повітрі та утворюються як побічні продукти при спалюванні газу. Вміст водяної пари при цьому становить близько 18 %об.

Температура димових газів на виході котла коливається в межах 130-180 °C і містить, крім явної теплоти, також скриту теплоту конденсації парів води (латентну теплоту) частка якої становить приблизно 11% від загальної кількості теплоти, що міститься в димових газах перед входом в димову трубу.

Латентна теплота виділяється при охолодженні димових газів до температури точки роси, що залежить від виду палива, його складу і коефіцієнту надлишку повітря, що подається на спалювання. На рис. 6.1 наведена залежність температури точки роси для метану.

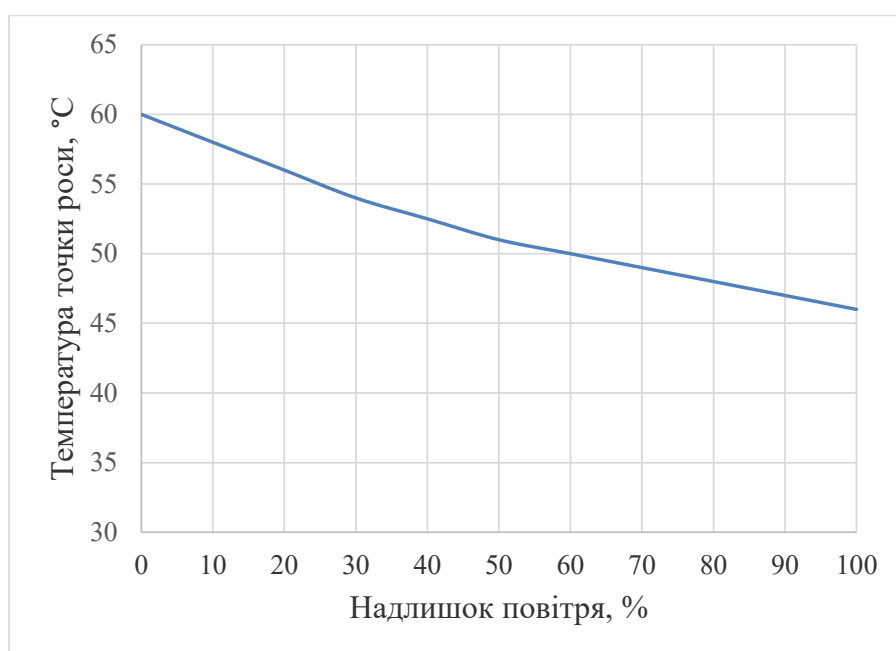


Рис. 6.1. Залежність температури точки роси для метану від надлишку повітря, що подається на спалювання.

При застосуванні способу глибокої утилізації теплоти димових газів відбувається їх охолодження в дві стадії. Спочатку димові гази охолоджуються в економайзері першої стадії де віддають теплоносію явну теплоту, при цьому їх температура на виході економайзера значно перевищує температуру точки роси. Далі димові гази надходять на охолодження в економайзер другої стадії де вони при охолодженні віддають теплоносію явну і латентну теплоту так як їх кінцева температура є нижчою, ніж температура точки роси. При цьому відбувається конденсація парів води 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.

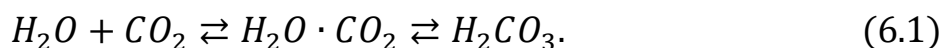
Також при конденсації парів води на поверхні твердого тіла (стілки труби) в середовищі діоксиду вуглецю відбувається утворення стабільних нанорозмірних бульбашок (так званих *bubstones*), що стабілізовані іонами домішок, що в незначній кількості присутні навіть в дистильованій воді [79, 264]. Таким чином забезпечується стабільне значення водневого показника кислого конденсату незважаючи на те, що концентрація діоксиду вуглецю вища за рівноважну.

Розчинність діоксиду вуглецю у воді значно вища у порівнянні з киснем і азотом і залежить від температури і тиску і наведена в таблиці 6.2.

Таблиця 6.2. Залежність розчинності газів у воді при тиску 1 атм. від температури

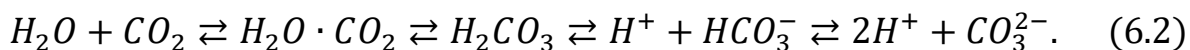
Газ	Розчинність газу у воді при тиску 1 атм. залежно від температури, см ³ /л				
	0 °C	10 °C	20 °C	30 °C	40 °C
Діоксид вуглецю	1730,0	1310,0	1050,0	850,0	710,0
Кисень	48,9	38,0	31,0	26,1	23,1
Азот	22,3	18,3	15,1	12,8	11,0

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. Константа швидкості реакції утворення вугільної кислоти становить $0,039 \text{ c}^{-1}$, а її розпаду – 23 c^{-1} , тобто повільніше майже в 600 разів.

На основі наведеного вище матеріалу можна стверджувати, що вуглекислий газ в конденсаті, утвореному з димових газів при спалюванні палива міститься як у розчиненому стані так і у вигляді мікро- і нанорозмірних бульбашок.

Таким чином, кислий конденсат димових газів є насиченим розчином діоксиду вуглецю і, відповідно, вугільної кислоти, що містить газову фазу у вигляді мікро- і нанорозмірних бульбашок.

Розрахунок максимальної величини рН насиченого водного розчину вуглекислоти показує, що при температурі $25 \text{ }^\circ\text{C}$ і тиску 1 атм рН становить 3,9, а при температурі $55 \text{ }^\circ\text{C}$ (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.

6.1.1. Розчинність діоксиду вуглецю у воді

Систему діоксиду вуглецю-вода вивчали на протязом багатьох років. Публікуються нові експериментальні дані рівноваги подвійної системи CO_2 -вода в широкому діапазоні температур від 278,2 до 318,2 К і тисків до 8 МПа.

Однак, попри те, досі існують деякі суперечки щодо термодинамічного опису поведінки цієї системи. Деякі дослідники вказують, що система CO_2 - H_2O точно моделюється рівнянням Кричевського-Касарновського, але інші, базуючись на

одержаних ними даних, не погоджуються з цим. Подано сумніву закону Генрі, обговорено обмеження рівняння Кричевського-Касарновського і зроблено висновок, що для температур, нижчих приблизно 100 °С, система CO₂–H₂O точно моделюється рівнянням Кричевського-Касарновського. З іншого боку, при температурах 100 °С і вище це вже не так. Щоб прийти до цього висновку, авторами цієї роботи досліджено чотири моделі розчинності використовуючи які, чітко продемонстровано, що коефіцієнти активності не є незначними і, отже, рівняння Кричевського-Касарновського не можна застосовувати при високих температурах.

Розчинність діоксиду вуглецю визначається як об'єм розчиненого газу в одиниці об'єму води (м³ CO₂/м³ H₂O або см³ CO₂/см³ H₂O). Якщо об'ємну концентрацію діоксиду вуглецю у воді помножити на густину CO₂ при відповідних температурі і тиску, одержимо величину масової концентрації діоксиду вуглецю у воді (кг/м³, г/см³ або мг/л). В технічній літературі, при аналізі складу котельних конденсатів або природної води, масову концентрацію розчинених газів визначають в мг/л H₂O, або в мг/кг H₂O.

В табл. 6.3 наведено значення об'ємної і масової розчинності діоксиду вуглецю у воді, а також густину газу CO₂ залежно від температури при величині парціального тиску діоксиду вуглецю у газовій фазі $p_g = 1$ атм. З таблиці видно, що з підвищенням температури розчинність CO₂ у воді знижується.

Відповідно до закону Генрі

$$c_M = k \cdot \hat{p}_g, \quad (6.3)$$

концентрація розчиненого в рідині газу c_M , визначена в мольних долях, прямо пропорційна парціальному тиску цього газу в газовій фазі $\hat{p}_g$. Закон Генрі можна також навести у вигляді

$$c_{lm} \% = \Gamma_k \cdot c_{gm} \%, \quad (6.3 \text{ a})$$

де $c_{gm} \%$ і $c_{lm} \%$ – відповідно, масова концентрація розчиненого газу в повітрі та у воді, а Γ_k – коефіцієнт Генрі, який за останніми даними за нормальних умов для діоксиду вуглецю $\Gamma_k = 590$.

Таблиця 6.3. Розчинність діоксиду вуглецю у воді залежно від температури при парціальному тиску CO_2 , що дорівнює 1 атм (101,325 кПа)

$T, ^\circ\text{C}$	0	5	10	15	20	25	30	40
$c_v, \text{м}^3/\text{м}^3 \text{H}_2\text{O}$	1,713	1,424	1,194	1,019	0,878	0,759	0,665	0,530
$\rho, \text{кг}/\text{м}^3$	1,938	1,903	1,870	1,837	1,806	1,776	1,746	1,690
$c_m, \text{мг}/\text{л} \text{H}_2\text{O}$	3320	2710	2230	1870	1580	1350	1160	890

Парціальний тиск CO_2 в повітрі при тиску 1 атм дорівнює 0,0003 атм. При будь-якому значенні тиску повітря парціальний тиск вуглекислого газу буде становити лише 0,03% від тиску повітря. Табл. 6.4 містить значення об'ємної та масової концентрації діоксиду вуглецю у воді в рівновазі з атмосферним повітрям в залежності від температури розчину. В цій таблиці також наведено значення парціальної густини CO_2 у повітрі при різних температурах.

Таблиця 6.4. Розчинність діоксиду вуглецю у воді залежно від температури при парціальному тиску CO_2 , що дорівнює 0,03 кПа (0,0001 атм)

$T, ^\circ\text{C}$	0	5	10	15	20	25	30	40
$c_v, \text{см}^3/\text{см}^3$	1,71	1,42	1,19	1,018	0,876	0,761	0,664	0,526
$c_m, \text{мг}/\text{л}$	0,996	0,813	0,669	0,561	0,474	0,405	0,348	0,267
$c_{lm} \%, 10^{-4} \text{г}/100 \text{г} \text{H}_2\text{O}$	9,96	8,13	6,69	5,61	4,74	4,05	3,48	2,67
$\rho_g, 10^{-6} \text{г}/\text{см}^3$	0,581	0,571	0,561	0,551	0,541	0,532	0,524	0,507

З табл. 6.4 видно, що при нормальних температурах розчинність діоксиду вуглецю у воді дорівнює приблизно 0,4 мг/л.

6.1.2. Постановка задачі аналітичного дослідження

Нехай конденсат, що підлягає обробці з метою його нейтралізації від вуглекислоти має початкову температуру $T_{l0} = 20^\circ\text{C}$ і знаходиться в контакті з повітрям під атмосферним тиском $p_l = p_a = 1$ атм. Будемо розглядати конденсат на виході з котла, як дистильовану воду з розчиненим в ній вуглекислим газом. При нормальному тиску повітря парціальний тиск CO_2 в повітрі $p_g = 0,0003$ атм або 0,03 кПа. Припустимо, що початковий вміст CO_2 в конденсаті на виході з котла

$c_{m0} = 70$ мг/л, що співпадає за порядком з результатами вимірювання, а також даними інших авторів. Кількість нерозчиненого діоксиду вуглецю, так званої вільної агресивної вуглекислоти, в турбінних конденсатах знаходиться в межах $30 \div 80$ мг/л. Надлишкова вільна, або агресивна вуглекислота, на відміну від рівноважної дуже активна, тому її наявність у воді спричиняє корозію металевих труб і обладнання. Конденсат пари повинен мати значення рН в межах 9 при 25°C і кількість вільної вуглекислоти не більше 10 мг/кг.

Але з табл. 6.4 випливає, що при зазначених величинах тиску конденсату p_l і його температури T_l рівноважна концентрація насичення діоксиду вуглецю у воді становить лише 0,47 мг/л. Тобто, вміст CO_2 в конденсаті в багато разів перевищує концентрацію насичення. Оскільки розчин не може стабільно існувати в такому пересиченому стані, слід вважати, що діоксид вуглецю міститься в воді у вигляді мікроскопічних бульбашок діаметром $0,1 \div 10$ мкм або нанорозмірних бабстоунів [467, 468] з діаметром менше 0,1 мкм. Бульбашки з діаметром більше 10 мкм під дією сили Архімеда повинні за відносно короткий проміжок часу покинути рідину.

Відомо, що газові зародки з діаметром $d_b \propto 1 \div 5$ мкм можуть дуже довго залишатись в рідині. Як вказано в [469], хоч досі нема чіткого теоретичного пояснення факту наявності в рідинах газових мікробульбашок, однак реальні, спеціально не очищені рідини завжди містять достатньо велику їх кількість. Ці бульбашки мали б з часом коагулювати і утворювати макробульбашки, які обов'язково повинні спливати і виходити з рідини через вільні поверхні. Наявність в рідині газових мікробульбашок свідчить, на думку авторів, про те, що причини їх утворення і розвитку пов'язані зі складними, поки ще не вивченими явищами на мікро- та макрорівнях. В роботі Р. Нігматуліна [470] 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⁻³. Ці дані є доказом того, що присутній в конденсаті вуглекислий газ перебуває переважно у

вигляді мікробульбашок і лише відносно незначна його частина знаходиться в розчиненому стані.

Таким чином, задача зводиться до вилучення з конденсату максимальної кількості нерозчиненого вуглекислого газу, що перебуває в бульбашковому стані. На цьому положенні, зокрема, базується запропонований спосіб його нейтралізації.

На виході з котла при конденсації водяної пари в трубі з домішками газових продуктів спалювання створюється рідинний конденсат, в якому присутні нерозчинені у воді газові бульбашки, що містять переважно діоксид вуглецю з незначною кількістю оксидів азоту. Після відстоювання конденсату при контакті з повітрям криві розподілу бульбашок за розміром знаходяться в інтервалі діаметрів від 10 нм до 5 мкм. Як було згадано, більш крупні бульбашки спливають і поступово вилучаються з рідини.

Один з можливих шляхів вилучення бульбашок з об'єму рідини полягає в зменшенні тиску над конденсатом до таких величин, щоб мікроскопічно бульбашки зростали до потрібного розміру ($d_b > 10$ мкм) і з часом виходили з рідини. Для цього, як показує аналіз, необхідно постійно підтримувати тиск над поверхнею конденсату нижче значення тиску насиченої пари води при відповідній температурі, тобто відкачувати парогазову суміш потужним вакуумним насосом. При температурі $T_l = 25^\circ\text{C}$ тиск насиченої водяної пари становить приблизно 0,03 атм, що потребує створення дуже високого розрідження при роботі вакуумного насоса.

Інший шлях пов'язаний зі зменшенням тиску всередині конденсату до таких величин, щоб внаслідок збільшення розмірів усіх присутніх в конденсаті бульбашок об'ємний вміст газу в рідині збільшився до критичних значень, при яких відбувається інверсія фаз. При цьому система “парогазові бульбашки – рідина” перетворюється в систему “краплі рідини – газ”. Це має полегшити процес відділення газової фази від рідини і таким чином зменшити кількість присутнього в рідині вуглекислого газу. Цей принцип також передбачається застосовувати для реалізації способу безреагентної нейтралізації кислого конденсату від вуглекислоти.

Для реалізації запропонованого способу запропоновано камеру рециркуляційної обробки конденсату з'єднати з патрубками входу і виходу РПА. Рідина в процесі обробки неодноразово проходить через канали РПА, в яких, як відомо, з великою частотою поперемінно відбувається різке збільшення тиску і наступне його спадання до від'ємних значень внаслідок миттєвого розтягування. Завдяки цьому, на стадії зменшення тиску в потоці рідини до дуже низьких значень бульбашки швидко зростатимуть до великих розмірів, утворюючи пінну структуру, після чого відбуватиметься інверсія фаз. На виході з РПА утворюватиметься крапельно-газова суміш, що поступатиме у вакуумну камеру, сполучену з вакуумним насосом ВВН. Розпилена рідина зі зниженим вмістом діоксиду вуглецю у вигляді крапель і утвореної з них плівки, що стікає по стінках камери, знову повертатиметься в конденсат, а парогазова фаза за допомогою вакуумного насоса вилучатиметься з камери. Ефективність процесу нейтралізації зростатиме завдяки багаторазовій рециркуляції кислого конденсату через РПА з подальшим його повторним розпилюванням в вакуумну камеру.

Основна мета даного аналітичного дослідження полягає у вивченні фізики процесу, визначенні і обґрунтуванні основних факторів, що впливають на інтенсивність видалення нерозчинного CO_2 з конденсату для зменшення його кислотності до потрібного рівня. Однією з задач аналітичних досліджень є оцінка оптимальних конструктивних і режимних параметрів на основі проведених розрахунків. Для точного чисельного моделювання також потрібно мати дані щодо значення вихідної кількості діоксиду вуглецю в конденсаті, розподілу в об'ємі конденсату бульбашок CO_2 за розміром та інформацію щодо особливості процесів, що відбуваються при проходженні газорідинної бульбашкової суміші через канали РПА, які потребують проведення окремих експериментальних досліджень.

6.1.3 Розрахунок газовмісту діоксиду вуглецю в конденсаті

При загальній концентрації діоксиду вуглецю в конденсаті після виходу з котла $c_{g0} = 70$ мг/л маса CO_2 в 1 см^3 води становить $m_{g0} = 7 \cdot 10^{-2}$ г. На виході з котла газ перебуває під атмосферним тиском $p_a = 1 \text{ атм} = 0,1 \text{ МПа}$. Згідно з даними табл. 6.4, маса CO_2 , що знаходиться у розчиненому стані в 1 см^3 води при 20°C , становить лише $4,7 \cdot 10^{-4}$ г, що менше 1% від загальної концентрації CO_2 в конденсаті.

Тоді з задовільною точністю можна вважати, що вся присутня в рідині кількість діоксиду вуглецю міститься в бульбашках, тобто загальна маса CO_2 в усіх бульбашках в 1 см^3 конденсату дорівнює $m_{g0} = 7 \cdot 10^{-2}$ г.

Якщо прийняти, що рідинно-газова бульбашкова суміш монодисперсна і діаметри бульбашок однакові, то в кожній бульбашці міститься однакова маса CO_2 . При розрахунку кількості монодисперсних бульбашок і маси діоксиду вуглецю в кожному з них треба брати до уваги, що окрім CO_2 в бульбашках присутня також насичена водяна пара. Загальний тиск газової фази в кожній бульбашці складається з парціального тиску діоксиду вуглецю p_{gb} і парціального тиску насиченої водяної пари $p_v < p_{sat}(T_l)$. Газ і водяна пара всередині бульбашок знаходиться під тиском

$$p_{gb} + p_{sat}(T_l) = p_{ext} + 2\sigma/R_b, \quad (6.4)$$

де p_{ext} – зовнішній тиск оточуючого газового середовища над поверхнею конденсату; R_b – радіус бульбашки; σ – поверхневий натяг на межі бульбашки з водою. Тоді парціальний тиск p_{gb} розраховується з рівняння

$$p_{gb} = p_{ext} + 2\sigma/R_b - p_{sat}(T_l), \quad (6.5)$$

якщо відомі температура рідини T_l , тиск газового середовища над конденсатом p_{ext} і радіус бульбашок R_b . Парціальну густину діоксиду вуглецю всередині бульбашки визначаємо з рівняння для ідеального газу

$$\rho_{gb} = \frac{p_{gb} M_g}{\tilde{R} T_g}, \quad (6.6)$$

де M_g – молекулярна маса; T_g – температура газової фази всередині бульбашки; $\tilde{R}$ – газова стала. Враховуючи, що молекулярна маса діоксиду вуглецю $M_g =$

44 кг/кмоль, а газова стала $\tilde{R} = 8,31$ Дж/моль·К, формулу можна звести до більш простого вигляду

$$\rho_{gb} = 5292,3 p_{gb} / T_g. \quad (6.7)$$

За цією формулою густина ρ_g визначається в кг/м³, якщо визначати тиск p_g в МПа, а температуру T_g – в градусах Кельвіна.

При будь-якому тиску і температурі густину вуглекислого газу в г/см³ можна розрахувати за формулою

$$\rho_{gb} = 0,52923 p_{gb} / T_g, \quad (6.8)$$

де p_{gb} – тиск газу, атм; T_g – температура газу, К.

Знаючи об'єм однієї бульбашки $V_{b1} = 4\pi R_b^3/3$ і визначаючи парціальну густину діоксиду вуглецю ρ_{gb} з (6.8), знаходимо масу CO₂ в окремій бульбашці:

$$m_{g1} = \rho_{gb} V_{b1}. \quad (6.9)$$

Якщо загальна маса діоксиду вуглецю в 1 см³ рідини дорівнює m_{g0} , а його маса в одній бульбашці m_{g1} , то кількість бульбашок в 1 см³ води визначається, як

$$N_b = m_{g0} / m_{g1}. \quad (6.10)$$

Об'єм газу в усіх бульбашках, що містяться в 1 см³ (газовміст рідини) визначається за формулою

$$V_{gb} = V_{b1} N_b. \quad (6.11)$$

Застосовуючи наведені вище формули, визначимо кількість парогазових бульбашок N_b і загальний об'єм бульбашок V_{gb} в 1 см³ монодисперсної бульбашково-рідинної суміші залежно від радіуса бульбашок. Загальний об'єм бульбашок V_{gb} в 1 см³ рідини визначає по суті початкове значення газовмісту V_{g0} .

Спочатку припустимо, що розміщений в ємності конденсат знаходиться в контакті з повітрям під тиском $p_{ext} = p_a = 1$ атм.

Розрахунки проведені при наступних вихідних параметрах:

- початкова концентрація CO₂ в конденсаті $m_{g0} = 70$ мг/л = $7 \cdot 10^{-5}$ г/см³;
- тиск газового середовища над конденсатом $p_{ext} = 100$ кПа;

- початкова температура конденсату $T_l = 25^\circ\text{C} = 298\text{ K}$;
- температура газу в бульбашці $T_g = T_l = 298\text{ K}$;
- тиск насиченої пари води при $T_l = 25^\circ\text{C}$ $p_{\text{sat}}(T_l) = 0,032\text{ атм} = 3,2\text{ кПа}$;
- поверхневий натяг на межі розділу рідина – газ $\sigma = 7,10^{-2}\text{ Н/м}$;
- початкові радіуси бульбашок R_{b0} : 0,5 мкм; 0,6 мкм; 0,7 мкм; 0,8 мкм; 1 мкм, 2 мкм, 3 мкм, 4 мкм, 5 мкм.

Результати розрахунків наведені в табл. 6.5.

Таблиця 6.5. Кількість бульбашок CO_2 в 1 см^3 рідини N_b і газовміст конденсату V_b в монодисперсній бульбашковій суміші конденсат – діоксид вуглецю при різних значеннях радіуса бульбашок R_b при $p_{\text{ext}} = 100\text{ кПа}$ і $m_{g0} = 70\text{ мг/л}$

R_{b0} , мкм	V_{b1} , 10^{-12} см^3	$2\sigma/R_b$, кПа	ρ_g , 10^{-3} г/см^3	m_g , 10^{-15} г	N_b , 10^9 см^3	V_{b0} , $\text{см}^3/\text{см}^3$
0,5	0,525	300	7,103	3,73	18,76	0,0098
0,6	0,904	250	6,215	5,62	12,45	0,01125
0,7	1,437	214	5,57	8,00	8,75	0,01267
0,8	2,144	188	5,114	10,96	6,38	0,01367
1,0	4,19	150	4,44	18,6	3,763	0,0157
2,0	33,5	75	3,05	102,17	0,68513	0,0229
3,0	113,1	50	2,61	292,2	0,2395	0,0270
4,0	268,1	37,5	2,38	638,08	0,1097	0,0294
5,0	523,6	30	2,25	1178,1	0,05941	0,0311
7,5	1767,1	20	2,07	3657,9	0,01913	0,0338
10,0	4188,8	15	2,00	8377,6	0,00835	0,0350

Якщо конденсат знаходиться в вакуумованій камері і тиск повітря над конденсатом становить 0,2 атм, а парціальний тиск CO_2 , як і до того, становить 0,03% від загального тиску, то для тих самих значень R_b кількість бульбашок в одиниці об'єму зросте, а газовміст зменшиться. Відповідні дані наведені в табл. 6.6.

Таблиця 6.6. Кількість бульбашок CO_2 в 1 см^3 рідини N_b і газовміст конденсату V_b в монодисперсній бульбашковій суміші конденсат – діоксид вуглецю при різних значеннях радіуса бульбашок R_b при $p_{ext} = 20 \text{ кПа}$ і $m_{g0} = 70 \text{ мг/л}$

R_{b0} , мкм	V_{b1} , 10^{-12} см^3	$2\sigma/R_b$, кПа	ρ_g , 10^{-3} г/см^3	m_g , 10^{-15} г	N_b , 10^9 см^3	V_{b0} , $\text{см}^3/\text{см}^3$
1,0	4,19	150	2,96	12,40	5,645	0,023
2,0	33,5	75	1,63	54,60	1,282	0,043
3,0	113,1	50	1,18	133,46	0,524	0,0592
4,0	268,1	37,5	0,964	258,45	0,2708	0,0726
5,0	523,6	30	0,831	435,11	0,1608	0,0842
7,5	1767,1	20	0,653	1153,9	0,0606	0,1070
10,0	4188,8	15	0,564	2362,4	0,0296	0,1239

З таблиць 6.5–6.8 випливає, що в монодисперсній бульбашковій суміші діоксиду вуглецю з водою кількість бульбашок в одиниці об'єму зростає зі зменшенням розміру бульбашок. Так, при зменшенні радіусу бульбашок від 10 мкм до 1 мкм кількість бульбашок N_b зростає в 200 разів (при $p_{ext} = 20 \text{ кПа}$) і в 500 разів (при $p_{ext} = 100 \text{ кПа}$). При цьому газовміст CO_2 в конденсаті змінюється набагато менше. При зменшенні радіусу бульбашок від 10 мкм до 1 мкм газовміст V_b знизиться приблизно вдвічі (при $p_{ext} = 100 \text{ кПа}$) і приблизно в 5 разів (при $p_{ext} = 20 \text{ кПа}$).

З наведених таблиць також випливає, що в бульбашках малого розміру парогазова суміш знаходиться переважно під дією капілярного тиску $p_\sigma = 2\sigma/R_b$, який може значно перевищувати зовнішній тиск p_{ext} . Слід звернути увагу, що при високому ступені насичення рідини діоксидом вуглецю в бульбашковому стані газовміст становитиме приблизно $1\div 2\%$.

Таблиця 6.7. Кількість бульбашок CO_2 в 1 см^3 рідини N_b і газовміст конденсату V_b в монодисперсній бульбашковій суміші конденсат – діоксид вуглецю при різних значеннях радіуса бульбашок R_b при $p_{ext} = 100 \text{ кПа}$ і $m_{g0} = 30 \text{ мг/л}$

R_{b0} , мкм	V_{b1} , 10^{-12} см^3	$2\sigma/R_b$, кПа	ρ_g , 10^{-3} г/см^3	m_g , 10^{-15} г	N_b , 10^9 см^3	V_{b0} , $\text{см}^3/\text{см}^3$
0,5	0,525	300	7,103	3,79	7,936	0,00416
0,6	0,904	250	6,215	5,61	5,347	0,00483
0,7	1,437	214	5,576	8,012	3,744	0,00538
0,8	2,144	188	5,11	10,95	2,739	0,00587
1,0	4,19	150	4,44	18,6	1,612	0,00675
2,0	33,5	75	3,05	102,17	0,2936	0,009835
3,0	113,1	50	2,61	292,2	0,1026	0,01160
4,0	268,1	37,5	2,38	638,08	0,0470	0,01260
5,0	523,6	30	2,25	1178,1	0,02546	0,01333
7,5	1767,1	20	2,07	3657,9	0,00820	0,0145
10,0	4188,8	15	2,00	8377,6	0,00351	0,0147

Таблиця 6.8. Кількість бульбашок CO_2 в 1 см^3 рідини N_b і газовміст конденсату V_b в монодисперсній бульбашковій суміші конденсат – діоксид вуглецю при різних значеннях радіуса бульбашок R_b при $p_{ext} = 20 \text{ кПа}$ і $m_{g0} = 30 \text{ мг/л}$

R_{b0} , мкм	V_{b1} , 10^{-12} см^3	$2\sigma/R_b$, кПа	ρ_g , 10^{-3} г/см^3	m_g , 10^{-15} г	N_b , 10^9 см^3	V_{b0} , $\text{см}^3/\text{см}^3$
0,5	0,525	300	5,68	2,98	10,067	0,0053
0,6	0,904	250	4,79	4,33	6,928	0,0062
0,7	1,437	214	4,155	5,97	5,025	0,0072
0,8	2,144	188	3,69	7,91	3,79	0,0081
1,0	4,19	150	2,96	12,40	2,419	0,0101
2,0	33,5	75	1,63	54,60	0,549	0,0184
3,0	113,1	50	1,18	133,46	0,2245	0,0254
4,0	268,1	37,5	0,964	258,45	0,1160	0,0311
5,0	523,6	30	0,831	435,11	0,0689	0,0361
7,5	1767,1	20	0,653	1153,9	0,0260	0,0459
10,0	4188,8	15	0,564	2362,4	0,0127	0,0532

6.2. Розроблення лабораторної установки для нейтралізації кислого конденсату продуктів згоряння природного газу

6.2.1. Комплектування лабораторної установки

Для комплектування лабораторної установки застосоване наступне обладнання і вимірювальні пристрої:

- 1) насос вакуумний для створення розрідження в камері апарата GUCUM GMVP 120/030;
- 2) електродвигун для роторного апарата АИР 90L2 2081, 3кВт, 3000 об/хв.;
- 3) промисловий рН-метр для контролю водневого показника нейтралізованого конденсату – вимірювач рН 71136421 (рН-метр промисловий рН-101П і датчик Д(рН)П-02Т);
- 4) багатофункціональний прилад EZODO РСТ-407 для вимірювання водневого показника, окисно-відновлювального потенціалу, електропровідності, температури і концентрації солей.

6.2.2 Основні технічні характеристики лабораторної установки

Основні технічні характеристики лабораторної установки для нейтралізації кислого конденсату продуктів згоряння природного газу (далі – лабораторна установка для нейтралізації кислого конденсату) наведені в табл. 6.9, а основні технічні характеристики основного робочого вузла лабораторної установки – РПА системи ротор-статор-ротор наведені в табл. 3.1 і табл. 6.10.

Таблиця 6.9. Основні технічні характеристики лабораторної установки для нейтралізації кислого конденсату

Технічний параметр	Значення
Максимальна продуктивність, л/год	до 1200
Номінальна продуктивність, л/год	200÷450
Робочий тиск (абсолютний), кПа (кгс/см ²)	10÷20 (0,1÷0,2)
Температура конденсату, °С	4÷55
Потужність електрична (встановлена), кВт не більше	3,75
Питоме споживання електроенергії, кВт·год/л/год	0,0187
Займана виробнича площа, м ² , не більше	0,52
Питома займана площа, м ² /л/год	0,0026
Маса, кг, не більше	200
Питома маса, кг/л/год	1,0
Габаритні розміри, не більше:	
Довжина, мм	800
Ширина, мм	650
Висота, мм	1100

Таблиця 6.10. Конструктивні параметри і технічні характеристики РПА

Конструктивний параметр	Значення
Зазор між циліндрами ротора і статора, мкм	500
Встановлена потужність, кВт	3
Кількість обертів, об/сек	50
Продуктивність, т/год	1÷10

6.2.3. Опис лабораторної установки

Лабораторна установка призначена для нейтралізації кислого конденсату продуктів згоряння природного газу. Принципова схема установки наведена на рис. 6.11, а її загальний вигляд – на рис. 6.12.

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.

Ємність двокамерна А1-2 має циліндричну форму зі знімною кришкою і призначена для ведення процесу нейтралізації кислого конденсату у вакуумі. Ємність всередині поділена перегородкою на дві рівні частини – камеру приймальну, та камеру рециркуляційної обробки конденсату. Між собою камери з'єднуються щілинами для перетікання рідини над і під перегородкою.

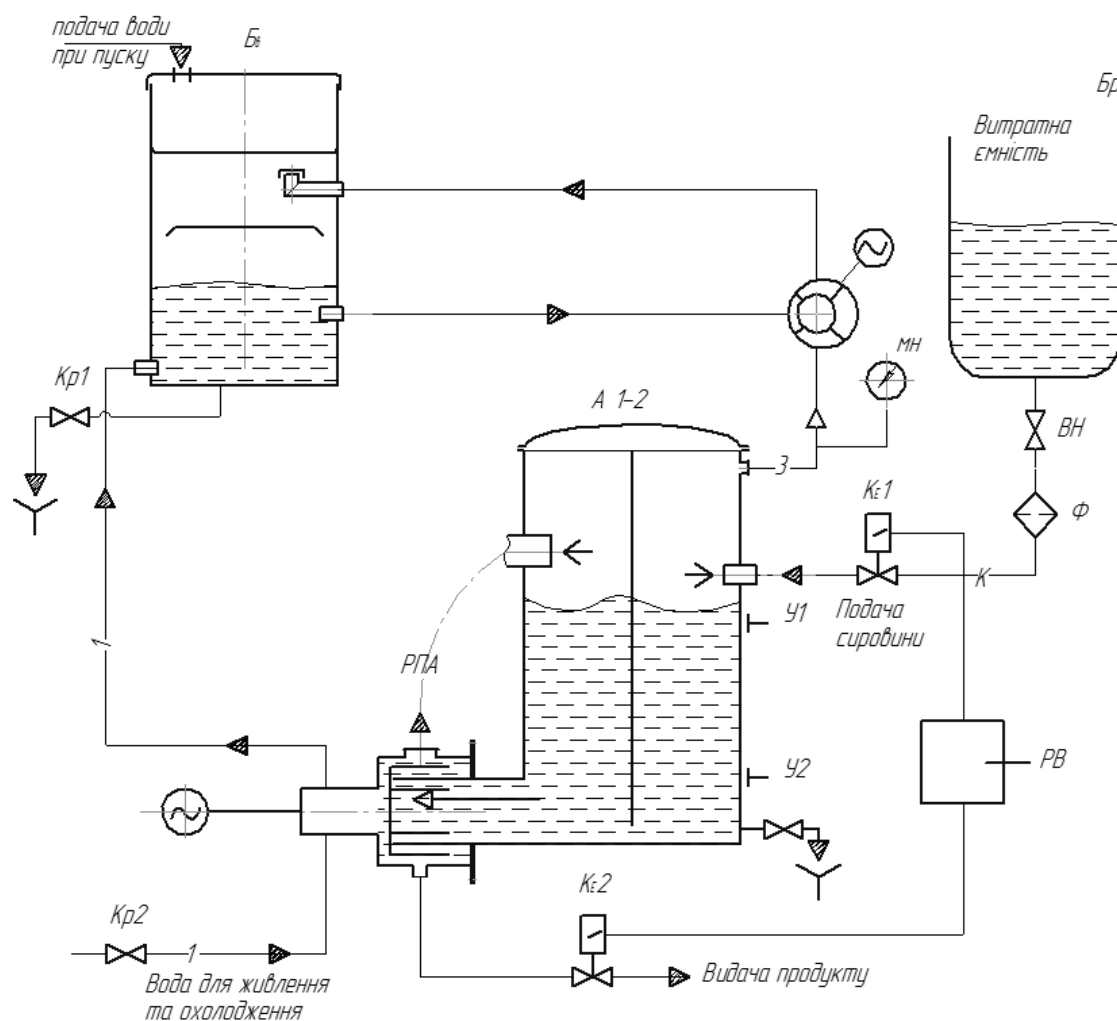


Рис. 6.11. Принципова схема лабораторної установки для нейтралізації кислого конденсату продуктів згоряння природного газу: А1-2 – ємність двокамерна; БВ – бачок водяний; РПА – роторно-пульсаційний апарат; ВВН – вакуумний насос.



а)



б)

Рис. 6.12. Загальний вигляд лабораторної установки для нейтралізації кислого конденсату продуктів згоряння природного газу

Приймальна камера ємності А1-2 з'єднана патрубком через електромагнітний клапан КЕ1, та клапан зворотний з ємністю БР подачі кислого конденсату від споживача. Крім того, приймальна камера з'єднується з насосом вакуумним ВВН. Друга камера ємності – рециркуляційної обробки з'єднана з патрубками входу та виходу конденсату РПА. Патрубок виходу конденсату з РПА закінчується в камері розпилювальним пристроєм. Таким чином, ємність А1-2 разом з РПА створюють рециркуляційний контур обробки рідини. Крім того, двокамерна ємність має

патрубок подачі вакууму з вакуумного насоса ВВН, а також штуцери датчиків показників рівня У1 та У2 та пробку зливу рідини з ємності.

Бачок трьохсекційний БВ призначений для роботи в замкнутому циклі системи водозабезпечення насоса вакуумного водокільцевого ВВН і складається з двох незалежних ємностей, з'єднаних між собою.

Верхня ємність бачка БВ призначена для заливання рідини перед запуском нейтралізатора. Нижня ємність бачка БВ має дві секції – верхню проміжну, що сполучена з вихідним патрубком насоса ВВН та функціонально роз'єднує воду і газу (повітря і неконденсовані газу), що відкачуються з ємності А1-2. Вода, відділена від газів, зливається через щілини знімної перегородки до нижньої секції зливної, до якої також через парубок входу подається вода від вузла ущільнень валу РПА. Цикл системи водозабезпечення нейтралізатора завершується зливом води з нижньої секції бачка БВ до системи водовідведення споживача.

РПА разом з вакуумною ємністю призначений для здійснення обробки кислого конденсату і видачі продукту під тиском з вакуумного середовища споживачу. Робочий корпус РПА з однієї сторони закріплюється на проміжному корпусі, а з другої має вихідний фланець до якого кріпиться патрубок ємності двокамерної А1-2. До цього ж фланця на штифтах кріпиться статор, який встановлюється з рівномірним зазором між роторами вала.

Відмінна особливість застосованого РПА полягає в тому, що він має два вихідних патрубки на робочому корпусі. Один патрубок з Ду 50 мм забезпечує рециркуляцію рідини в контурі «ємність А 1-2 – РПА», а другий патрубок з Ду 20 мм забезпечує подачу готового нейтралізованого продукту (води) споживачу.

Насос вакуумний ВВН призначений для створення вакууму в ємності двокамерній А1-2 і досягнення абсолютного тиску, необхідного для забезпечення технологічного процесу нейтралізації конденсату.

Пульт керування, електроустаткування КВП і А призначені для вмикання (вимикання) електроустановок і автоматичного керування технологічним процесом нейтралізації конденсату.

6.3. Експериментальні дослідження процесу нейтралізації кислого конденсату продуктів згоряння природного газу

6.3.1. Методика проведення експериментальних досліджень

Дослідження проводили з метою визначення залежності зміни водневого показника і температури рідини від тривалості її обробки і продуктивності лабораторної установки для нейтралізації кислого конденсату. На обробку подавали модельну рідину, близьку за фізико-хімічними показниками до конденсату продуктів згоряння природного газу і кислий конденсат продуктів згоряння природного газу.

Обробку кислого конденсату і модельної рідини проводили наступним чином. Кислий конденсат з накопичувальної ємності надходив у двокамерну ємність А1-2, всередині якої за допомогою вакуумного насоса ВВН підтримували абсолютний тиск $10 \div 20$ кПа ($0,1 \div 0,2$ ата). Накопичений в ємності А1-2 конденсат всмоктувався РПА, де в роторно-статорному вузлі відбувалась гідродинамічна обробка рідини з високими швидкостями і градієнтами зсуву, які разом з кавітаційним ефектом дозволяли отримувати підвищення величини водневого показника конденсату за рахунок вилучення вуглекислоти. Далі, через вихідний патрубок РПА, рідина через форсунку розпилювалась в рециркуляційну камеру обробки ємності А1-2, де перебігала друга стадія процесу вилучення вуглекислоти. Глибина вилучення вуглекислоти при цьому залежала від тривалості рециркуляції рідини в контурі «ємність А1-2 – РПА». Після закінчення циклу обробки оброблена рідина відводилась з установки через патрубок виходу готового продукту, а в приймальну камеру ємності А1-2 надходила нова порція кислого конденсату на обробку. Далі цикл повторювався.

Модельну рідину готували шляхом насичення свіжоприготовленої води дистильованої діоксидом вуглецю у формі гранул («сухий лід») не створюючи при цьому надлишкового тиску над поверхнею рідини (кришка ємності мала відкритий патрубок для скидання надлишкового тиску) протягом однієї доби.

Первинну обробку кислого конденсату і модельної рідини в лабораторній установці проводили протягом 16 хвилин шляхом рециркуляції в кількості 33 л в замкнутому контурі при відсутності видачі обробленої рідини з установки. Зразки проб рідини відбирали через кожні 2 хвилини протягом всього часу обробки з метою визначення оптимального часу обробки рідини на основі результатів вимірювання водневого показника.

Обробку рідини при робочих параметрах роботи лабораторної установки проводили шляхом початкового завантаження 33 л модельної рідини. Обробку проводили протягом 5 хвилин після чого з установки відвантажували 16 л обробленої рідини і завантажували 16 л рідини для обробки. Обробку проводили знову протягом 5 хвилин після чого цикл повторювався. Зразки проб рідини відбирали через кожних 2,5 і 5 хвилин (протягом половини і повної тривалості кожного циклу обробки) з метою визначення водневого показника рідини.

Продуктивність лабораторної установки вимірювали шляхом фіксування часу витікання рідини у відтаровану ємність з врахуванням інтервалу часу циклів обробки рідини.

Тиск на виході з РПА (перед форсункою) і у ємності A1-2 контролювали (підтримували постійним) протягом всього часу обробки.

Розташування точок вимірювань досліджуваних параметрів при проведенні досліджень процесу обробки рідини на лабораторній установці нейтралізатора безреагентного наведені на рис. 6.13.

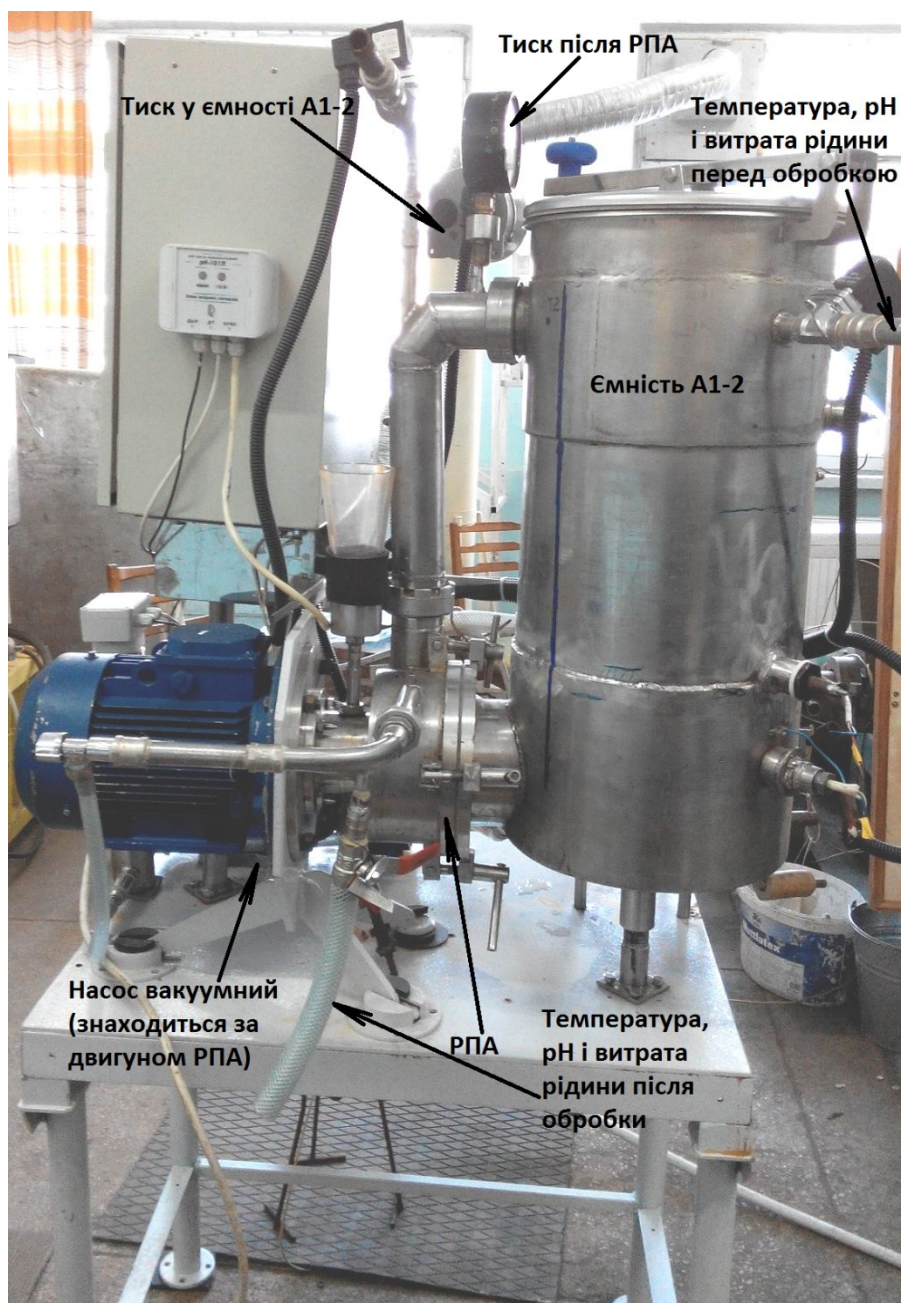


Рис. 6.13. Розташування точок вимірювань досліджуваних параметрів при проведенні досліджень процесу обробки рідини на лабораторній установці для нейтралізації кислого конденсату

Специфікація приладів, використаних при проведенні експериментальних досліджень параметрів роботи лабораторної установки наведена в табл. 6.11.

Таблиця 6.11. Специфікація приладів, використаних при проведенні експериментальних досліджень параметрів роботи лабораторної установки

№ з/п	Найменування вимірювань	Прилади для вимірювань	Діапазон вимірювання	Точність вимірювань або клас точності
Водневий показник				
1	Рідина перед обробкою	Багатофункціональний прилад COnDO EZODO РСТ-407 для аналізу параметрів води	$-2 \div 16.00$ рН	± 0.01 рН+1 цифра
2	Рідина після обробки	Багатофункціональний прилад COnDO EZODO РСТ-407 для аналізу параметрів води	$-2 \div 16.00$ рН	± 0.01 рН+1 цифра
Температура				
3	Рідина перед обробкою	Багатофункціональний прилад COnDO EZODO РСТ-407 для аналізу параметрів води	$0 \div 110$ °С	± 0.2 °С+1 цифра
4	Рідина після обробки	Багатофункціональний прилад COnDO EZODO РСТ-407 для аналізу параметрів води	$0 \div 110$ °С	± 0.2 °С+1 цифра
Тиск				
5	У ємності А1-2	Вакуумметр ДВ 2010СГУ	$-1 \div 0$ кгс/см ²	1,5
6	На виході з РПА (перед розпилувачем)	Мановакуумметр МВПЗ-У	$-1 \div 5$ кгс/см ²	1,5
Витрата				
7	Рідини на виході з установки	Електронний секундомір, відтарована ємність (16 л)	—	—

Під час обробки рідини тиск (абсолютний) в ємності А1-2 становив 0,17 ата.
Середнє значення величини тиску на виході з РПА (перед форсункою) – 1,2 ата.

6.3.2. Визначення зміни величини водневого показника і температури модельної рідини від тривалості її обробки

При визначенні зміни величини водневого показника і температури модельної рідини від тривалості її обробки на лабораторній установці для нейтралізації кислого конденсату отримано наступні результати, які наведені в табл. 6.12. Вимірювання величини водневого показника проводили одразу після відбору зразків.

Таблиця 6.12. Зміна величини водневого показника і температури модельної рідини від тривалості її обробки на лабораторній установці для нейтралізації кислого конденсату (вимірювання проводили одразу після відбору зразків)

Зразок	pH	Температура, °C
Вихідний зразок (0 хв.)	4,04	15,1
2 хв.	4,82	18,0
4 хв.	4,99	19,2
6 хв.	4,98	22,2
8 хв.	5,08	24,5
10 хв.	5,14	32,8
12 хв.	5,26	32,8
14 хв.	5,37	34,8
16 хв.	5,49	38,8

Результати проведених досліджень показують, що найбільша швидкість зміни водневого показника рідини спостерігається протягом перших 2÷4 хвилин обробки після чого спостерігається його подальше рівномірне зростання протягом всього часу обробки, проте з нижчою швидкістю.

6.3.3. Визначення зміни величини водневого показника і температури модельної рідини при роботі лабораторної установки в робочому режимі

При визначенні зміни величини водневого показника і температури при обробці модельної рідини на лабораторній установці для нейтралізації кислого конденсату при тривалості циклу обробки рідини 5 хвилин отримано наступні

результати, які наведені в табл. 6.13. Вимірювання величини водневого показника проводили одразу після відбору зразків.

Таблиця 6.13. Зміна величини водневого показника при обробці модельної рідини на лабораторній установці для нейтралізації кислого конденсату (вимірювання проводили одразу після відбору зразків)

Зразок	pH	Температура, °C
Перший цикл обробки		
Вихідний зразок (0 хв.)	4,04	15,1
2,5 хв.	4,70	22,5
5 хв.	4,78	26,1
Другий цикл обробки		
Початкове значення (0 хв.)	—	—
2,5 хв.	4,68	27,2
5 хв.	4,82	30,5
Третій цикл обробки		
Початкове значення (0 хв.)	—	—
2,5 хв.	4,70	29,1
5 хв.	4,95	33,0
Четвертий цикл обробки		
Початкове значення (0 хв.)	—	—
2,5 хв.	4,89	33,3
5 хв.	5,16	35,7

6.3.4. Визначення зміни величини водневого показника модельної рідини до і після обробки від тривалості її зберігання

Відібрані під час досліджень (див. підрозділи 6.3.2 і 6.3.3) зразки модельної рідини зберігали протягом п'яти діб в негерметично закритих поліетиленових стаканах без доступу прямого сонячного світла. Вимірювання величини водневого показника проводили через 30 хвилин і через 5 діб після обробки. Результати наведені в табл. 6.14 – 6.16.

Таблиця 6.14. Зміна величини водневого показника і температури модельної рідини від тривалості її обробки на лабораторній установці для нейтралізації кислого конденсату (вимірювання проводили через 30 хвилин після відбору зразків)

Зразок	pH	Температура, °C
Вихідний зразок (0 хв.)	4,04	15,1
2 хв.	4,88	16,7
4 хв.	5,03	17,6
6 хв.	5,12	18,8
8 хв.	5,21	19,7
10 хв.	5,28	21,1
12 хв.	5,40	23,6
14 хв.	5,49	24,5
16 хв.	5,59	25,6

Таблиця 6.15. Зміна величини водневого показника і температури модельної рідини від тривалості її обробки на лабораторній установці для нейтралізації кислого конденсату (вимірювання проводили через 5 діб після відбору зразків)

Зразок	pH	Температура, °C
Вихідний зразок (0 хв.)	4,52	15,9
2 хв.	6,39	15,8
4 хв.	6,64	15,8
6 хв.	6,78	15,8
8 хв.	6,83	15,8
10 хв.	6,90	16,0
12 хв.	6,93	15,8
14 хв.	7,01	16,0
16 хв.	7,05	15,8

Таблиця 6.16. Зміна величини водневого показника при обробці модельної рідини на лабораторній установці для нейтралізації кислого конденсату (вимірювання проводили через 5 діб після відбору зразків)

Зразок	pH	Температура, °C
Перший цикл обробки		
Вихідний зразок (0 хв.)	4,52	15,9
2,5 хв.	6,74	16,0
5 хв.	6,82	16,0
Другий цикл обробки		
Початкове значення (0 хв.)	—	—
2,5 хв.	6,06	16,0
5 хв.	6,43	15,9
Третій цикл обробки		
Початкове значення (0 хв.)	—	—
2,5 хв.	6,86	16,1
5 хв.	6,88	16,0
Четвертий цикл обробки		
Початкове значення (0 хв.)	—	—
2,5 хв.	6,81	15,9
5 хв.	6,85	16,0

6.3.5. Визначення зміни величини водневого показника і температури конденсату продуктів згоряння природного газу від тривалості його обробки

При визначенні зміни величини водневого показника і температури конденсату продуктів згоряння природного газу від тривалості його обробки на лабораторній установці для нейтралізації кислого конденсату отримано наступні результати, які наведені в табл. 6.17. Вимірювання величини водневого показника проводили одразу після відбору зразків.

Таблиця 6.17. Зміна величини водневого показника і температури конденсату продуктів згоряння природного газу від тривалості його обробки на лабораторній установці для нейтралізації кислого конденсату (вимірювання проводили одразу після відбору зразків)

Зразок	pH	Температура, °C
Вихідний зразок (0 хв.)	4,04	9,8
2 хв.	4,78	13,4
4 хв.	4,94	17,0
6 хв.	4,96	20,6
8 хв.	5,02	23,9
10 хв.	5,09	26,8
12 хв.	5,19	31,1
14 хв.	5,32	34,2
16 хв.	5,40	39,0

Результати проведених досліджень показують, що найбільша швидкість зміни водневого показника рідини спостерігається протягом перших 2÷4 хвилин обробки після чого спостерігається його подальше рівномірне зростання протягом всього часу обробки, проте з нижчою швидкістю.

6.3.6. Визначення зміни величини водневого показника конденсату продуктів згоряння природного газу до і після обробки від тривалості його зберігання

Відібрані під час досліджень (див. підрозділ 6.3.5) зразки конденсату продуктів згоряння природного газу зберігали протягом двох діб в негерметично закритих поліетиленових стаканах без доступу прямого сонячного світла. Вимірювання величини водневого показника проводили через 3 години, 1 добу і 2 доби після обробки. Результати наведені в табл. 6.18 – 6.20.

Таблиця 6.18. Зміна величини водневого показника і температури конденсату продуктів згоряння природного газу від тривалості його обробки на лабораторній установці для нейтралізації кислого конденсату (вимірювання проводили через 3 години після відбору зразків)

Зразок	pH	Температура, °C
Вихідний зразок (0 хв.)	4,04	10,3
2 хв.	5,38	10,8
4 хв.	5,47	11,3
6 хв.	5,54	12,0
8 хв.	5,58	12,2
10 хв.	5,61	12,7
12 хв.	5,67	12,8
14 хв.	5,79	13,0
16 хв.	5,88	13,0

Таблиця 6.19. Зміна величини водневого показника і температури конденсату продуктів згоряння природного газу від тривалості його обробки на лабораторній установці для нейтралізації кислого конденсату (вимірювання проводили через 1 добу після відбору зразків)

Зразок	pH	Температура, °C
Вихідний зразок (0 хв.)	4,08	9,2
2 хв.	6,01	9,0
4 хв.	6,14	9,0
6 хв.	6,17	9,1
8 хв.	6,18	9,0
10 хв.	6,19	9,0
12 хв.	6,24	9,0
14 хв.	6,31	9,0
16 хв.	6,35	9,0

Таблиця 6.20. Зміна величини водневого показника і температури конденсату продуктів згоряння природного газу від тривалості його обробки на лабораторній установці для нейтралізації кислого конденсату (вимірювання проводили через 2 доби після відбору зразків)

Зразок	pH	Температура, °C
Вихідний зразок (0 хв.)	4,09	8,2
2 хв.	6,03	7,9
4 хв.	6,19	7,8
6 хв.	6,21	8,0
8 хв.	6,23	7,8
10 хв.	6,23	8,0
12 хв.	6,26	7,8
14 хв.	6,36	8,0
16 хв.	6,39	7,9

6.3.7. Аналіз отриманих результатів

Зміну величини водневого показника модельної рідини після її обробки на лабораторній установці для нейтралізації кислого конденсату зображено на рис. 6.14. Отримані результати показують, що основна зміна величини pH відбувається приблизно протягом 2 хвилин обробки. Подальша обробка рідини також призводить до підвищення величини pH, 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 pH рідини. Після витримки обробленої рідини можна отримати значення величини pH не нижче 6,0 при тривалості рециркуляції (часу обробки) $1,5 \div 2$ хвилини.

Зміну температури модельної рідини під час її обробки на лабораторній установці для нейтралізації кислого конденсату зображено на рис. 6.15. Підвищення температури рідини зумовлено дисипативним виділенням теплоти в рідині під час її

обробки. Швидкість підвищення температури становила приблизно $1,5^{\circ}\text{C}/\text{хв}$. При тривалості одного робочого циклу $1,5\div 2$ хвилини підвищення температури оброблюваної рідини несуттєве.

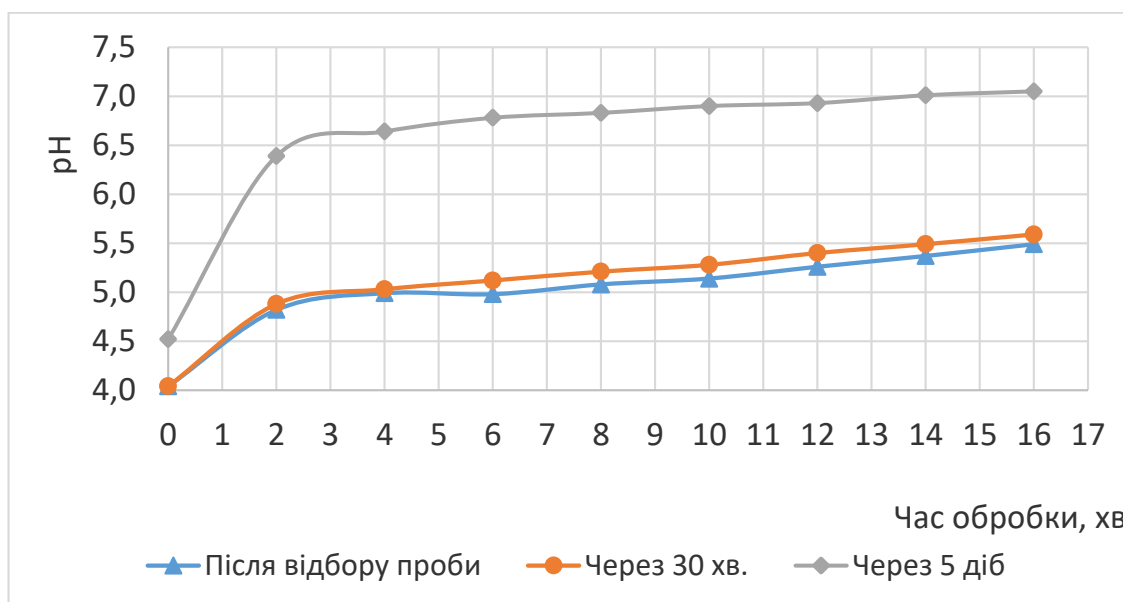


Рис. 6.14. Зміна величини водневого показника модельної рідини після її обробки на лабораторній установці для нейтралізації кислого конденсату

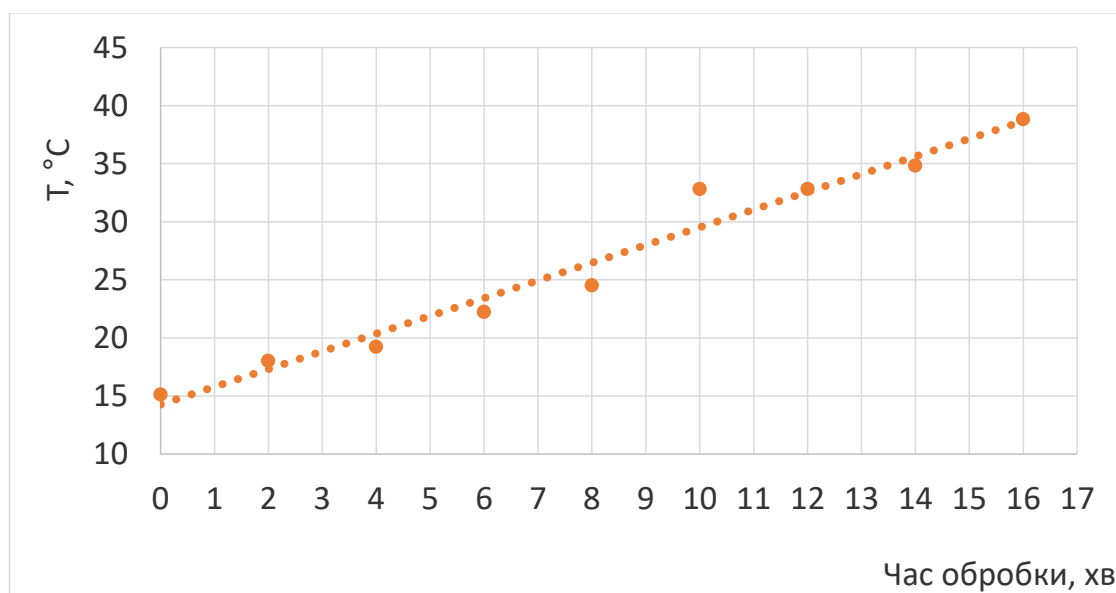


Рис. 6.15. Зміна температури модельної рідини під час її обробки на лабораторній установці для нейтралізації кислого конденсату

На рис. 6.16 і 6.17 наведено зміну величини водневого показника модельної рідини при роботі лабораторної установки для нейтралізації кислого конденсату в робочому режимі. Отримані результати показують, що значення величини водневого показника обробленої рідини після кожного циклу обробки приблизно однакове. Подальше зростання величини водневого показника після завершення обробки зумовлено тим, що в обробленій воді продовжується перебіг ряду процесів. Після завершення процесу релаксації водневий показник оброблених зразків рідини досягає стабільного значення, що перевищує 6,0.

Також на рис. 6.18 наведено зміну величини електропровідності модельної рідини після її обробки на лабораторній установці для нейтралізації кислого конденсату. Результати показують, що електропровідність обробленої рідини знижується більш, ніж вдвічі і залишається постійною. Суттєве зниження електропровідності рідини відбувається протягом перших двох хвилин обробки, подальше продовження обробки практично вже не впливає на зміну електропровідності рідини.

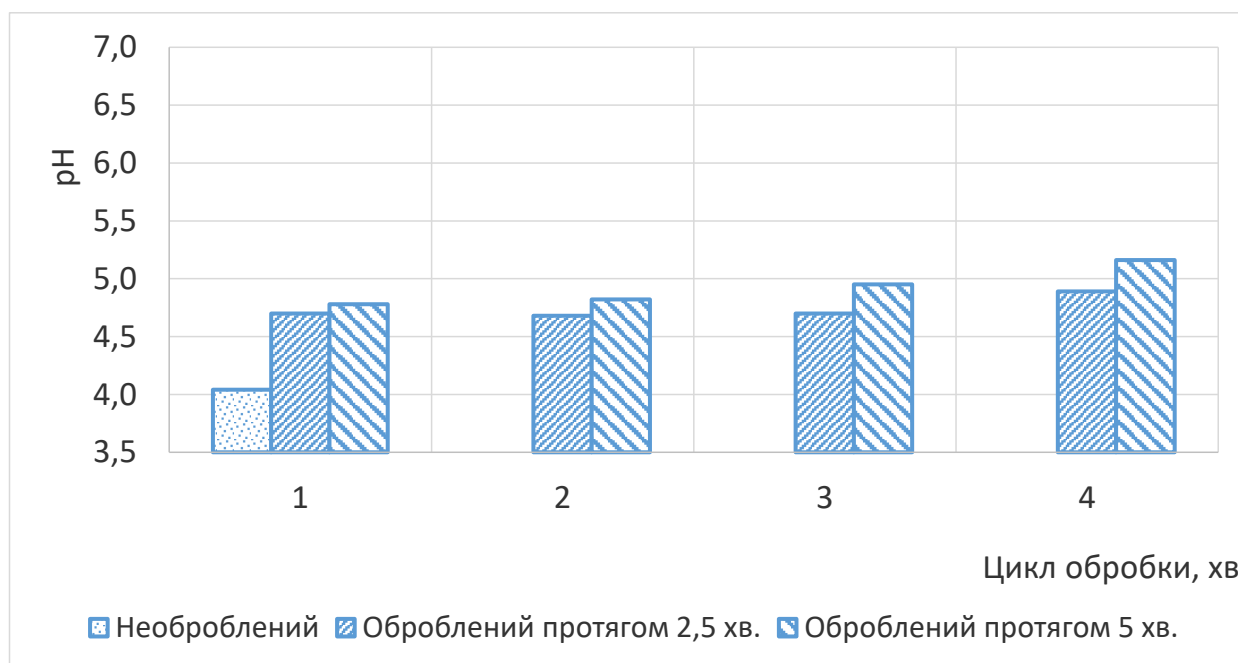


Рис. 6.16. Зміна величини водневого показника модельної рідини при роботі лабораторної установки для нейтралізації кислого конденсату в робочому режимі (вимірювання проводили одразу після відбору зразків)

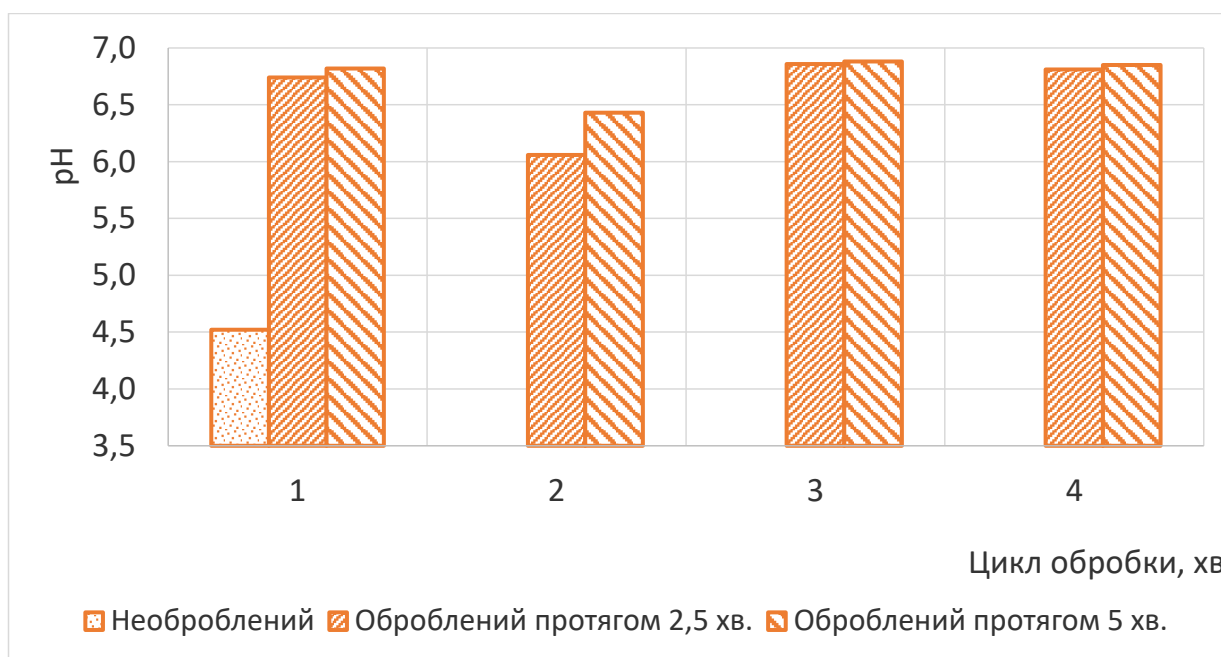


Рис. 6.17. Зміна величини водневого показника модельної рідини при роботі лабораторної установки для нейтралізації кислого конденсату в робочому режимі (вимірювання проводили через 5 діб після відбору зразків)

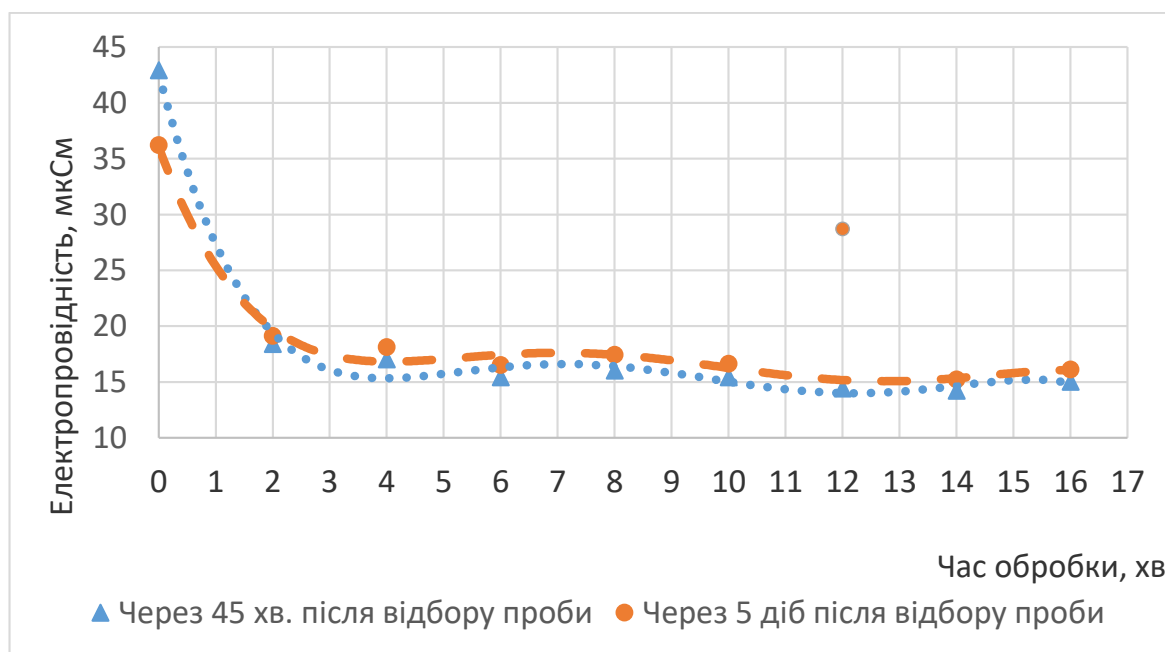


Рис. 6.18. Зміна величини електропровідності модельної рідини після її обробки на лабораторній установці для нейтралізації кислого конденсату

На рис. 6.19 наведено зміну величини водневого показника конденсату продуктів згоряння природного газу після його обробки на лабораторній установці для нейтралізації кислого конденсату. Отримані результати показують, що закономірність зміни величини водневого показника конденсату схожа зі зміною рН модельної рідини, зображеної на рис. 6.14. Зміну температури конденсату продуктів згоряння природного газу під час його обробки на лабораторній установці для нейтралізації кислого конденсату зображено на рис. 6.20. Підвищення температури рідини внаслідок дисипативного виділення теплоти становило приблизно $1,8^{\circ}\text{C}/\text{хв}$ і для робочого циклу $1,5 \div 2$ хв несуттєве. 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.

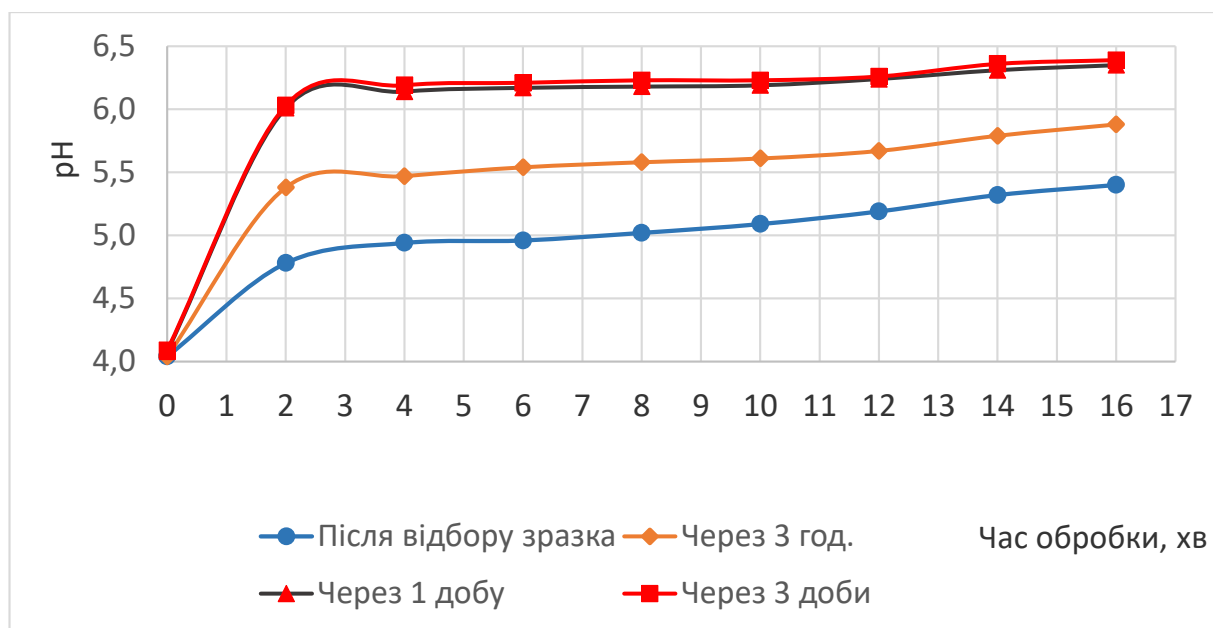


Рис. 6.19. Зміна величини водневого показника конденсату продуктів згоряння природного газу після його обробки на лабораторній установці для нейтралізації кислого конденсату

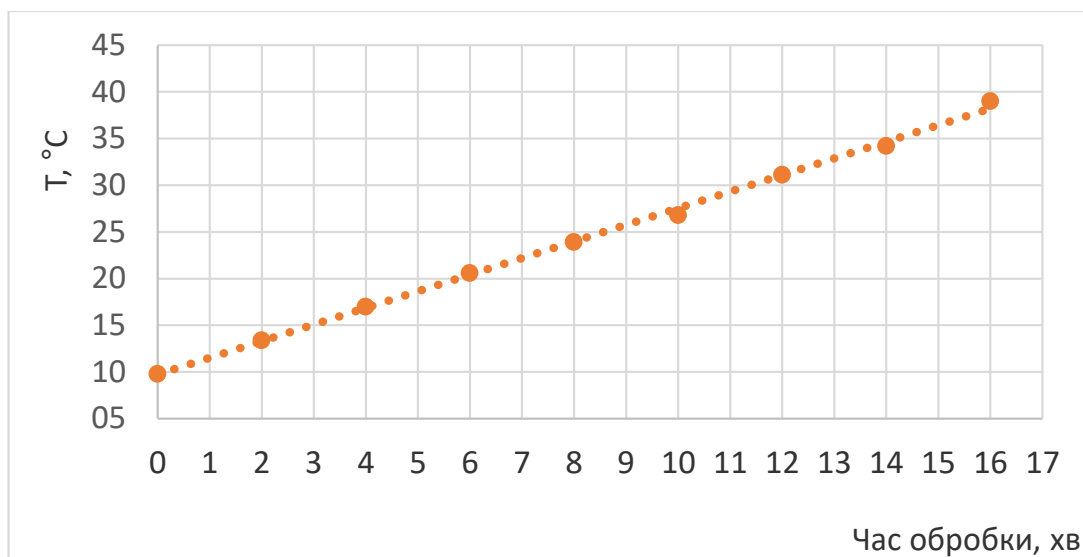


Рис. 6.20. Зміна температури конденсату продуктів згоряння природного газу під час її обробки на лабораторній установці для нейтралізації кислого конденсату

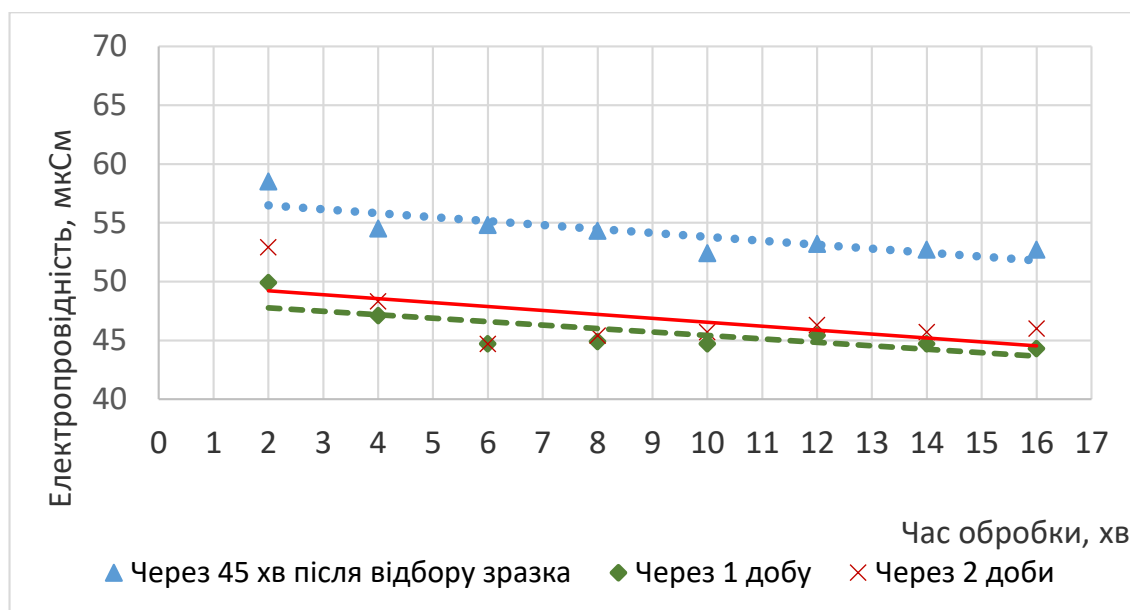


Рис. 6.21. Зміна величини електропровідності конденсату продуктів згоряння природного газу після його обробки на лабораторній установці для нейтралізації кислого конденсату

Також на рис. 6.21 наведено зміну величини електропровідності конденсату продуктів згоряння природного газу після його обробки на лабораторній установці для нейтралізації кислого конденсату. Початкове значення величини електропровідності конденсату становило 62,0 мкСм. Результати показують, що

електропровідність обробленого конденсату знижується зі збільшенням тривалості його обробки. Найбільше зниження електропровідності відбувалось протягом перших 2÷4 хв обробки, подальше продовження обробки суттєво вже не впливало на зміну електропровідності. Також спостерігається зниження електропровідності через одну добу зберігання, що можна пояснити релаксацією рідини після обробки.

6.4. Висновки до розділу 6

1. Проаналізовано механізм утворення конденсату продуктів згоряння природного газу. Встановлено, що концентрація діоксиду вуглецю в ньому значно перевищує рівноважну і залишається стабільною протягом тривалого періоду.

2. Встановлено, що стабільно вища за рівноважну концентрація вугільної кислоти зумовлена присутністю в рідині мікро- і нанобульбашок, що зумовлюють новий рівноважний стан в системі «рідина-газ».

3. Проведено розрахунки концентрації бульбашок діоксиду вуглецю і газовмісту в монодисперсній бульбашковій суміші «конденсат – діоксид вуглецю» для різних значень радіуса бульбашок залежно від зовнішнього тиску і масової концентрації діоксиду вуглецю.

4. При обробці модельної рідини протягом 16 хв. обробки в замкнутому циркуляційному контурі лабораторної установки для нейтралізації кислого конденсату отримано підвищення водневого показника на 1,45 од. рН. При повторному вимірюванні через 30 хвилин після обробки величина водневого показника обробленої рідини зросла на 1,55 од. рН, а через 5 діб – на 2,53 од. рН порівняно зі зразком необробленої рідини і становив 7,05.

5. При обробці конденсату продуктів згоряння природного газу протягом 16 хв обробки в замкнутому циркуляційному контурі лабораторної установки для нейтралізації кислого конденсату отримано підвищення водневого показника на 1,36 од. рН. При повторному вимірюванні через 3 години після обробки величина водневого показника обробленого конденсату зросла на 1,84 од. рН, через 1 добу –

на 2,27 од. рН, а через 2 доби – на 2,3 од. рН порівняно зі зразком необробленого конденсату і становив 6,39.

6. Для забезпечення кінцевого значення величини водневого показника не нижче 6,0 одразу після обробки тривалість рециркуляції рідини повинна становити не менше 15 хвилин, що призведе до зниження продуктивності лабораторної установки приблизно в сім разів.

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

РОЗДІЛ 7

ПРОМИСЛОВЕ ЗАСТОСУВАННЯ ОБЛАДНАННЯ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ВПРОВАДЖЕННЯ

7.1. Розроблення інноваційного обладнання для безреагентної нейтралізації кислого конденсату продуктів згоряння природного газу

На на базі способу кавітаційної дегазації рідини розроблене інноваційне обладнання для безреагентної нейтралізації кислого конденсату продуктів згоряння природного газу (далі – нейтралізатор безреагентний). Обладнання розроблене в рамках виконання науково-технічної роботи «Розроблення двокамерної установки для безреагентної нейтралізації кислих конденсатів продуктів згоряння газу в опалювальних та промислових котельнях» за Державним замовленням згідно договору № ДЗ/52-2015 від 30.10.2015 р., номер державної реєстрації 0115U005525 (копія технічного завдання на виконання роботи наведена в додатку В).

7.1.1. Визначення продуктивності дослідного зразка установки нейтралізатора безреагентного

Для визначення продуктивності дослідного зразка установки (рис. 6.9, 6.12) визначали час набору рідини в ємність А1-2 (16 л), час видачі обробленої рідини з установки (16 л) і задавали тривалість циклу обробки рідини 5 хвилин. Дослідження проводили при обробці модельної рідини. Отримані результати наведені в табл. 7.1.

Середню продуктивність установки визначали за формулою:

$$G = X \cdot \frac{3600}{\tau}, \quad (7.1)$$

де G – середня продуктивність установки, л/год.;

X – об'єм рідини, що оброблюється протягом одного циклу, л;

τ – тривалість одного циклу, с.

Середній час набору рідини – 19 с.; середній час зливу рідини – 59 с.;

Сумарний середній час зливу і набору рідини – 78 с.

Таблиця 7.1. Визначення тривалості набору рідини в ємність А1-2 і тривалості видачі обробленої рідини з дослідного зразка установки

Цикл обробки	Час набору рідини в ємність А1-2, с	Час видачі обробленої рідини з установки, с
Перший	—	55
Другий	18	60
Третій	19	60
Четвертий	19	59

При встановленій тривалості рециркуляції рідини 5 хвилин тривалість одного циклу роботи установки становить 378 с. (5 хв. рециркуляція і 78 с. злив і завантаження рідини) середня продуктивність установки становитиме:

$$G_1 = 16 \cdot 3600 / 378 = 152 \text{ л/годину.}$$

Якщо взяти до уваги результати, наведені на рис. 6.14 і 6.17, для отримання значення водневого показника не нижче 6,0 достатньо тривалості рециркуляції $1,5 \div 2,5$ хвилин.

При встановленій тривалості рециркуляції рідини 2 хвилини тривалість одного циклу роботи установки становить 198 с. (2 хв. рециркуляція і 78 с. злив і завантаження рідини) середня продуктивність установки становитиме:

$$G_2 = 16 \cdot 3600 / 198 = 290 \text{ л/годину.}$$

Так як при роботі конденсаційного котла з 1 МВт теплової потужності максимально може утворитись приблизно 140 л кислого конденсату, дослідний зразок установки нейтралізатора безреагентного може забезпечити нейтралізацію кислого конденсату від котлів сумарною тепловою потужністю як мінімум 2,1 МВт так як в реальних умовах кількість утвореного кислого конденсату може бути значно нижчою.

Результати, наведені в табл. 7.1 показують, що є можливість підвищення продуктивності дослідного зразка установки нейтралізатора безреагентного шляхом зменшення тривалості видачі обробленої рідини з установки. Якщо тривалість видачі обробленої рідини з установки буде дорівнювати тривалості набору рідини в

ємність A1-2, а тривалості рециркуляції рідини становитиме 1,5 хвилини (згідно рис. 6.14) максимально можливе значення середньої продуктивності для даної конструкції дослідного зразка установки становитиме:

$$G_{\max} = 16 \cdot 3600 / 128 = 450 \text{ л/годину},$$

що може забезпечити нейтралізацію кислого конденсату від котлів сумарною тепловою потужністю як мінімум 3,2 МВт.

7.1.2. Результати аналізів фізико-хімічних параметрів рідини до і після обробки на дослідному зразку установки нейтралізатора безреагентного

Проведено визначення в екологічній лабораторії підприємства «ЕКОМЕДСЕРВІС» основних фізико-хімічних параметрів чотирьох зразків модельної рідини: необробленої, обробленої протягом 5, 10 і 15 хвилин на дослідному зразку установки нейтралізатора безреагентного. Зразки передали в лабораторію одразу після проведеної обробки. Отримані результати містяться в протоколі № E168/16 дослідження об'єктів довкілля від 05 грудня 2016 р. копія якого наведена в додатку А.

Також в лабораторії цього ж підприємства проведено визначення основних фізико-хімічних параметрів трьох зразків конденсату продуктів згоряння природного газу: необробленого, обробленої протягом 5 і 10 хвилин на дослідному зразку установки нейтралізатора безреагентного. Зразки передали в лабораторію через добу після проведеної обробки з метою отримання стабільного значення величини водневого показника, так як в рідині після обробки спостерігали подальше його зростання. Отримані результати містяться в протоколі № E169/16 дослідження об'єктів довкілля від 16 грудня 2016 р. копія якого наведена в додатку Б.

7.1.3. Вимірювання показників тиску і температури дослідного зразка установки нейтралізатора безреагентного під час роботи

Під час роботи дослідного зразка установки нейтралізатора безреагентного визначали тиск і температуру рідини в основних робочих вузлах установки, температуру поверхонь і її розподіл.

Значення тиску фіксували за допомогою встановлених мановакуумметрів, які встановлені на установці. Температуру рідини визначали за допомогою термопари. Отримані значення наведені в табл. 7.2.

Таблиця 7.2. Покази температури і тиску при роботі дослідного зразка установки нейтралізатора безреагентного

Параметри роботи, одиниця вимірювання	Значення
Абсолютний тиск в ємності А1-2 при обробці модельної рідини, ата	0,17
Абсолютний тиск в ємності А1-2 при обробці конденсату, ата	0,18
Середнє значення величини тиску на виході з РПА (перед форсункою), ата	1,2
Межі зміни температури рідини, °С	9,8 ÷ 39,0

Температуру поверхонь дослідного зразка установки нейтралізатора безреагентного під час роботи визначали за допомогою високотемпературного пірометра-реєстратора СЕМ Instruments DT-8867Н (діапазон вимірювання температури від -50 °С до 1650 °С в безконтактному режимі при використанні інфрачервоного датчика). Схема розташування точок вимірювання температури поверхонь дослідного зразка установки наведена на рис. 7.1. Результати наведено в таблиці 7.3.



Рис. 7.1. Схема розташування точок вимірювання температури поверхонь дослідного зразка установки нейтралізатора безреагентного

Таблиця 7.3. Температура поверхонь дослідного зразка установки
нейтралізатора безреагентного під час роботи

Зразок	Температура, °C
До ввімкнення установки	
T.1(камера A1-2)	18,6
T.2(камера A1-2)	19,7
T.3(камера A1-2)	21,0
T.4 (РПА)	23,6
Перший цикл обробки	
T.1(камера A1-2)	18,3
T.2(камера A1-2)	20,1
T.3(камера A1-2)	20,1
T.4 (РПА)	20,1
Другий цикл обробки	
T.1(камера A1-2)	16,6
T.2(камера A1-2)	17,1
T.3(камера A1-2)	17,1
T.4 (РПА)	20,8
Третій цикл обробки	
T.1(камера A1-2)	20,0
T.2(камера A1-2)	23,0
T.3(камера A1-2)	20,0
T.4 (РПА)	21,0
Четвертий цикл обробки	
T.1(камера A1-2)	21,6
T.2(камера A1-2)	20,7
T.3(камера A1-2)	22,8
T.4 (РПА)	23,0
П'ятий цикл обробки	
T.1(камера A1-2)	21,0
T.2(камера A1-2)	20,0
T.3(камера A1-2)	21,0
T.4 (РПА)	24,0

Розподіл температури під час роботи дослідного зразка установки нейтралізатора безреагентного проводили за допомогою тепловізора ULIRvision TI 160 (діапазон вимірювання температури від -20 °C до 350 °C). Результати вимірювання наведено на рис. 7.2.

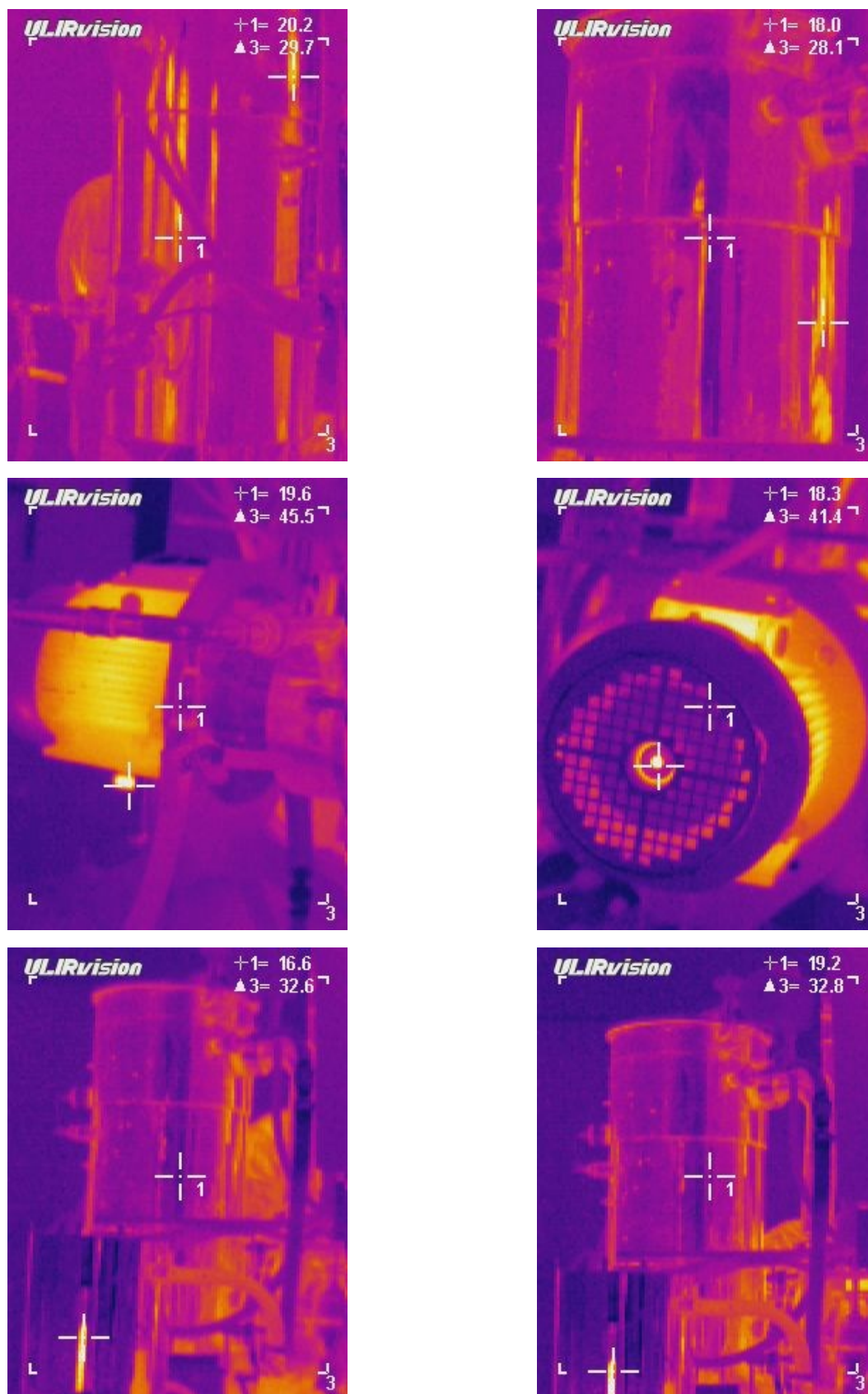


Рис. 7.2. Розподіл температури на поверхні дослідного зразка установки нейтралізатора безреагентного під час його роботи

7.1.4. Техніко-економічна ефективність запропонованого способу безреагентної нейтралізації

Запропонований спосіб нейтралізації кислого конденсату 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 (табл. 7.4) показано, що загальні витрати на 1 тону продукції з використанням обладнання ІТТФ НАН України в 2-3 рази менші порівняно з обладнанням, яке використовується на практиці.

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.). На початковому етапі планується їх виготовлення в кількості 20 шт. за рік з подальшим збільшенням їх випуску. Лімітна ціна установки становить 90 тис. грн. 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. м³ 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 200 тис. грн. на протязі року.

Загальна кількість котельних в Україні, що працюють на природному газі становить близько 16 тисяч.

Таблиця 7.4. Порівняльна характеристика різних типів обладнання для нейтралізації кислого конденсату

Порівняльні параметр	Нейтралізація твердим реагентом	Рідинна нейтралізація	Декарбонізація	Установка нейтралізатора безреагентного
Продуктивність, т/год.	0,140	0,420	1	1,2
Кількість блоків, шт.	8	3	1	1
Вартість реагенту, грн./рік	149 940	39 984	0	0
в т. ч. на обробку 1 т конденсату, грн.	34,68	9,18	0	0
Вартість обладнання, грн.	812 940	1 481 686	680 680	238 000
в т. ч. на 1 т конденсату, грн.	188,36	343,4	181,56	59,84
Вартість електроенергії на обробку 1 т конденсату (енергоефективність), грн.	54,0	15,6	55,2	66
Загальні витрати на обробку 1 т конденсату, грн.	277,04	368,18	236,76	125,84

7.1.5. Рекомендації щодо промислового використання обладнання

1. На основі розробленої конструкторської документації виготовлено дослідний зразок установки нейтралізатора безреагентного для нейтралізації кислого конденсату продуктів згоряння природного газу.

2. Встановлено, що величина водневого показника обробленого конденсату продовжує зростати після обробки, тому для отримання величини водневого показника не нижче 6,0 достатньо забезпечити тривалість його рециркуляції протягом $1,5 \div 2,5$ хвилин після чого витримати до отримання необхідного значення рН.

3. При обробці конденсату продуктів згоряння природного газу отримано значення водневого показника нейтралізованого конденсату, що перевищує 6,0 при продуктивності установки 290 л/год (при тривалості рециркуляції рідини 2 хв) і витримуванні його протягом однієї доби. Схожі результати отримано при обробці модельної рідини.

4. Забезпечити кінцеве значення величини водневого показника конденсату не нижче 6,0 одразу після обробки можна за рахунок збільшення тривалості рециркуляції рідини (приблизно до 15 хвилин), але це призведе до зниження продуктивності дослідного зразка установки.

5. Отримане середнє значення продуктивності установки 290 л/год (при тривалості рециркуляції рідини 2 хв) відповідає максимально можливій кількості кислого конденсату, що утвориться при роботі конденсаційного газового котла тепловою потужністю 2,1 МВт. Проте, існує можливість підвищити середнє значення продуктивності установки даної конструкції до 450 л/годину, що може забезпечити нейтралізацію кислого конденсату від котлів сумарною тепловою потужністю як мінімум 3,2 МВт.

6. Для збільшення продуктивності дослідного зразка установки нейтралізатора безреагентного рекомендовано мінімізувати тривалість завантаження оброблюваної рідини в ємність А1-2 і тривалість видачі обробленої води з установки.

7. Для інтенсифікації процесу нейтралізації рекомендовано розглянути можливість підвищення ступеня розпилювання рідини в ємності A1-2 шляхом вибору оптимальної конструкції розпилювального пристрою, підтримувати тиск в ємності A1-2 на мінімально можливому рівні для підвищення якості дегазації рідини, здійснювати подачу кислого конденсату на обробку при якомога вищій температурі за рахунок встановлення дослідного зразка установки поруч з економайзером конденсаційного котла або оснащення накопичувальної ємності з кислим конденсатом тепловою ізоляцією.

8. Проведено приймальні випробування дослідного зразка установки за результатами яких встановлено, що дослідний зразок установки нейтралізатора безреагентного може бути рекомендований для впровадження в систему глибокої утилізації теплоти димових газів від газових котлів для нейтралізації кислого конденсату продуктів згоряння природного газу (Додатки Г, Д).

7.2. 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 кількості 70 % змішувати з водою в кількості 30 % та обробляти в РПА при швидкості обертання ротора 50 с^{-1} 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.

7.3. Рекомендації щодо промислового використання обладнання для зниження жорсткості води

Проведені дослідження показали, що для забезпечення показника жорсткості води 0,08 °Ж оптимальний вміст гідроксиду амонію в розчині повинен становити 0,1 % мас. при швидкості зсуву потоку рідини $40 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$, що узгоджується з загальноприйнятими вимогами щодо якості води для водогрійних котлів згідно яких жорсткість води не повинна перевищувати 0,05–0,1 °Ж.

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.

7.4. Висновки до розділу 7

1. На на базі способу кавітаційної дегазації рідини розроблене інноваційне обладнання для безреагентної нейтралізації кислого конденсату продуктів згоряння природного газу.

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

3. На базі проведених попередніх випробувань дослідного зразка установки нейтралізатора безреагентного надано рекомендації щодо вибору режимних параметрів роботи установки з метою підвищення продуктивності її роботи, що дозволить підвищити середнє значення продуктивності установки даної конструкції.

4. Визначено оптимальну продуктивність розробленого дослідного зразка установки нейтралізатора безреагентного, що становить 450 л/годину і може забезпечити нейтралізацію кислого конденсату від котлів сумарною тепловою потужністю як мінімум 3,2 МВт.

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

6. Встановлено, що отримана водовугільна суспензія може бути використана як універсальне водовугільне паливо, яке можна застосовувати для спалювання в котлах, печах, різноманітному теплоенергетичному обладнанні, двигунах внутрішнього згоряння тощо.

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 Ренольдса, 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 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 $0,01 \text{ ммоль/дм}^3$ необхідно проводити обробку при швидкості зсуву потоку рідини $40 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$ протягом $9 \div 10$ 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 $p_0 = 0,30 \text{ МПа}$, тиску на виході сопла $p_k = 0,011 \text{ МПа}$ ефективність дегазації становила 99,2 % після обробки протягом 6 хв і при цьому розрахований мінімальний тиск в горловині сопла становив $-9,2 \text{ бар}$.

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. м³ 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.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Brennen Ch. E. Cavitation and Bubble Dynamics. Oxford Univers. Press, 1995.— 294 p.
2. Franc J.-P., Michel J.-M. Fundamentals of Cavitation. Springer, Science & Business Media, 2006, 300 p.
3. Carpenter J., Badve M., Rajoriya S., George S., Saharanand V.K., Pandit A.B. Hydrodynamic cavitation: an emerging technology for the intensification of various chemical and physical processes in a chemical process industry. Rev. in Chem. Eng.— 2016.—33 (5), pp.1–36.
4. Ashokkumar M., Krasulya O., Shestakov S., Rink R. A new look at cavitation and the applications of its liquid-phase. Effects in the processing of food and fuel. Applied Physics Research.—2012.—4, (1), pp. 19–29.
5. Young F.R. (1989) Cavitation. – London: World Scientific, 1999. – 444 pages.
6. Sun X., Manickam S., Tao Y., Wu X. Fundamentals of acoustic and hydrodynamic cavitation. Ultrason. Sonochem. –2025. –16 September 2025, 107573.
7. Долинский А.А., Иваницкий Г.К. Тепломассообмен и гидродинамика в парожидкостных дисперсных средах. Теплофизические основы дискретно-импульсного ввода энергии.— Киев: Наукова думка, 2008.—381 с.
8. Долинский А.А., Басок Б.И., Гулый И.С., Накорчевский А.И., Шурчкова Ю.А. Дискретно-импульсный ввод энергии в технологиях. К.: ИТТФ НАНУ, 1997. 208 с.
9. Dolinsky A., Ivanitsky G. The principle of discrete-pulse energy input – new approach to the development of efficient power-saving technologies. Ann.Review of Heat Transfer. Vol. XIII. 2003. N.-Y, Wallingford (UK): Begell House Inc. pp.47–83.
10. Процеси та обладнання глибокої переробки органічної сировини: конспект лекцій. Навч. посіб. для студ. спеціальності 133 Галузеве машинобудування. /КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.:Г.К. Іваницький, А.Р. Степанюк. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. –292 с.

11. Rooze J., Rebrov E. V., Schouten J. C., Keurentjes J. T. F. Cavitation and dissolved gas: a review. *Ultrason. Sonochem.*–2013.–20 (1), pp. 1–11.
12. Soyama H. Luminescence intensity of vortex cavitation in a Venturi tube changing with cavitation number. *Ultrason. Sonochemistry*, 2021, Vol.71, 105389.
13. Tong Qu, Jing Luo, Weilin Xu, Jie Li, Guihua Fu, Yueqing Ma, Zhuoqi Zhao. Experimental study on the collapse behavior of cavitation bubbles under low ambient pressure conditions. *Ultrason. Sonochemistry*.–2025.–Vol.114, March, 107255.
14. Dular M., Griessler-Bulc T., Gutierrez-Aguirre I., Heath E., Kosjek T., Klemenčič A.K., Oder M., Petkovšek M., Rački N., Ravnika M., Šarc A., Širok B., Zupanc M., Žitnik M., Kompare B. Use of hydrodynamic cavitation in (waste) water treatment. *Ultrason Sonochem.*–2017.–Vol.29, pp. 577–588.
15. Suslick K.S. *Sonochemistry. Science.*–1990.–Vol.97, March.–P.1439–1445.
16. Moholkar V.S., Pandit A.B. Bubble behavior in hydrodynamic cavitation: Effect of turbulence. *AIChE Journal*. 43 (6), 1997, 1641–1648.
17. Борц Б.В., Скоромная С.Ф., Ткаченко В.И. Стационарные состояния и автомодельная динамика газовых пузырьков в жидких средах при уменьшении внешнего давления. *Вісник Харківського університету*. –2011.–№946, С. 81–89.
18. Deshmukh A.R., Rohit H.R., Gautam A.Ch., Sain M., Singh A. Hydrodynamic cavitation: unveiling the phenomenon and its fundamentals. In book: *Futuristic Trends in “Agricul. Eng. Food Sci.*–2024.–Vol.3, Part 4, Chapter 9.–pp. 555–577.
19. West L.G.M., Simões A.J.R., Teixeira L.R., dos Santos C.A., Oliveira L.R., Pereira L.G., Ferreira V.P., Simões A.L.A., Queiroz L.M., Pepe I.M. Hydrodynamic cavitation induced by different nozzle shapes in pressurized conduits, instrumented by optical detection, searching for pressure correlation. 13 pages. Posted: 23 Sep 2024. Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=4965019> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4965019>
20. Fuchs J. The case for micro-bubbles in cavitation enhancement. *Cleaning Technologies Group*. Posted on January 29, 2019 by J. Fuchs.

21. Alhmiedy O.A., Belaissaoui B., Rode S. A simple yet accurate model for sizing hollow fiber membrane contactors in degassing applications: Relationship between mass transfer efficiency, liquid flow rate, membrane area and pressure drop for a liquid-in-lumen configuration. *Separation and Purification Technology*. –2025. –March, 132551.
22. Ezzatneshan E., Akbari A. Dynamics of cavitation bubble collapse in isothermal and cryogenic fluids: Influence of condensable and non-condensable gases. *Intern. Journal of Thermal Sciences*. –2025. –Vol.211, May 2025, 109710.
23. Gedanken A. Using sonochemistry for the fabrication of nanomaterials. *Ultrason. Sonochem*. –2005. –11 (2). – pp. 7–55.
24. Yasuda K., Nakayama S., Asakura Y. Characteristics of nanoemulsion prepared by tandem acoustic emulsification at a high frequency. *J. Chems. Japan*. –2012. –45 (9), pp. 734–736.
25. Chen Y. et al. A study of coal aggregation by standing-wave ultrasound. *Fuel*. –2019. –Vol. 98. –pp. 38–46.
26. Chemat F., Huma Z., Khan M.K. Applications of ultrasound in food technology: Processing, preservation and extraction. *Ultrason. Sonochemistry*. –2011. –18 (4), pp. 813–835.
27. Yusof N.S.M., Anandan S., Sivashanmugam P., Flores E.M.M., Ashokkumar M. A correlation between cavitation bubble temperature, sonoluminescence and interfacial chemistry. A minireview. *Ultrason. Sonochem*. –2022. –85, 105988, 10 pages.
28. Nakamura Sh., Koch M., Tervo M., Aghelmaleki A., Mettin R. Acoustic Cavitation Effects at Reduced Static Pressure. *DAS|DAGA 2025 Copenhagen*, 4 p.
29. Fuchs F.J. Ultrasonic cleaning and washing surfaces. *Power Ultrasonics. Applications of High-Intensity Ultrasound*, 2015, pp. 577–609.
30. Highly Efficient De-Aeration of Liquids using Ultrason. *Hielscher Ultrason. GmbH*. –2025.
31. Amani M., Al-Juhani S., Al-Jubouri M., Yrac R., Taha A. Application of Ultrasonic Waves for Degassing of Drilling Fluids and Crude Oils. *Advances in Petroleum Exploration and Development*. –2016. –11 (2), pp. 21–30.

32. Asakura Yo, Yasuda K. Frequency and power dependence of ultrasonic degassing. *Ultrason. Sonochem.*—2022 – Vol.82, 8 pages.
33. Eskin D. G. Ultrasonic degassing of liquids. In book: *Power Ultrason.: Applications of High-Intensity Ultrasound*. United Kingdom, Woodhead Publishing, 2015, pp 611–631.
34. Eskin D.G. Overview of ultrasonic degassing development. *Light Metals*, Springer, 2017. pp. 1437–1443.
35. Suslick K.S., Didenko Yu., Fang M.M., Hyeon T., Kolbeck K.J., McNamara III W.B., Mdleleni M.M., Wong M. Acoustic cavitation and its chemical consequences. *Phil. Trans. Royal. Soc. Lond. A.*—1994.— Vol.357, 335–353.
36. Yasui K. *Acoustic Cavitation and Bubble Dynamics*. Springer Nature, 2018, 194 pages.
37. Pétrie Ch., Francony A. Ultrasonic waste-water treatment: incidence of ultrasonic frequency on the rate of phenol and carbon tetrachloride degradation. *Ultrason. Sonochem.*—1997.—4 (4), pp. 295–300.
38. Barry B., Klima M.S., Cannon F.S. Effects of desliming and hydroacoustic cavitation treatment on the flotation of ultrafine bituminous coal. *Int. J. Coal Prep. Utiliz.* *Int. J. Coal Prep. Utiliz.* —2017.—37 (4), pp. 213–224.
39. Grieser F., Choi P.-K., Enomoto N., Harada H., Okitsu K., Yasui K., Asakura Y., Kimura T., Kondo T., Nomura H., Saito S., Yasuda K. *Sonochemistry and the acoustic bubble*. Elsevier.—2015, 298 pages.
40. Servant G., Caltagirone J.P., Gérard A., Laborde J.L., Hita A. Numerical simulation of cavitation bubble dynamics induced by ultrasound waves in a high frequency reactor. *Ultrason. Sonochem.* —2000. 7 (4), pp. 217–227.
41. Mozafari M., Johnson Ch., Hatziantoniou S., Demetzos C. Nanoliposomes and their application in food nanotechnology. *J. liposome research.*—2008. —Vol. 18, pp. 309–327.
42. Coussios C.C., Roy R.A. Applications of acoustics and cavitation to noninvasive therapy and drug delivery. *Ann. Rev. Fluid Mech.*—2008.— 40 (1).—pp. 395-420.

43. Qin D., Lei Sh., Chen B., Li Zh., Wang W., Ji X. Numerical investigation on acoustic cavitation characteristics of an air-vapor bubble: Effect of equation of state for interior gases. *Ultrason. Sonochem.*–2023.–97, 106456, 11 pages.
44. Choi P.-K. Acoustic Bubbles and Sonoluminescence. *Handbook of Ultrason. and Sonochemistry*, M. Ashokkumar, (ed.), Springer Science ,Singapore.–2016.– pp. 177–205.
45. Pierce A.D. Acoustics, an introduction to its physical principles and applications. *Physics Today*. –1989. –34(12), 768 pages
46. 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. *Physics of Aerodisperse Systems*, 2023, 61, 227–240.
47. Feng H., Barbosa-Cánovas G. V., Weiss J. *Ultrasound technologies for food and G.* – New York : Springer, 2011. – T. 1. – C. 599.
48. Yusof N.S.M., Anandan S., Sivashanmugam P., Flores E.M.M., Ashokkumar M. A correlation between cavitation bubble temperature, sonoluminescence and interfacial chemistry. A minireview. // *Ultrason. Sonochem.*–2022.–85, 105988, 10 pages.
49. Manasseh R. Acoustic Bubbles, Acoustic Streaming, and Cavitation Microstreaming. *Handbook of Ultrason. and Sonochemistry*, M. Ashokkumar, (ed.), Springer Science, Singapore 2015, 36 pages.
50. Gogate, Parag R.; Pandit, Aniruddha B. Cavitation Generation and Usage Without Ultrasound: Hydrodynamic Cavitation. *Theoretical and Experimental Sonochemistry Involving Inorganic Systems*, by Ashokkumar, Muthupandian, Springer Science+Business Media B.V., 2010, pp. 69–106.
51. Gogate P.R., Pandit A.B. A review and assessment of hydrodynamic cavitation as a technology for the future. *Ultrason. Sonochemistry*. – 2005.– Vol.12, pp. 21–27.
52. Вітенько Т.М. Гідродинамічна кавітація у масообмінних, хімічних і біологічних процесах. Тернопіль: ТДТУ ім. І. Пулюя, 2009. 220 с.
53. Ozonk J. Application of hydrodynamic cavitation in environmental engineering. CRC Press, London, 2012, 125 pages.

54. Marin Šako M., Staniscia F., Netz R.R., Schneck E., Matej M. Nanoscale defects and heterogeneous cavitation in water. (Slovenia, Germany), 10 pages.
55. Яхно О.М., Коваль О.Д., Пищенко Л.І., Паскалов В.П., Яске М.М. Монографія, наукове видання "Кавітація в переробці нафти".– Київ:– "Світ", 1994. – 218– 235 с.
56. Lin W., Duan X., He S., Wang J., Wang G. Molecular dynamics simulation study of ultrasound induced cavitation. Ultrason. Sonochem.–2025.–97, 107445, 11 pages
57. Gogate PR, Kabadi AM. A review of applications of cavitation in biochemical engineering/biotechnology. Biochem Eng J 2009; 44: 60–72.
58. Postema M., de Jong, N., Schmitz. G. Shell rupture threshold, fragmentation threshold, Blake threshold. IEEE International Ultrasonics Symposium, Sept 2005, Rotterdam, Netherlands. pp. 1708–1711.
59. Henglein A. Contributions to various aspects of cavitation chemistry. Adv. Sonochem.–1993.– 3, 17–83.
60. Tebyani S., Talabazar F.R., Ghorbani M., Koşar A. On the effect of fluid temperature in hydrodynamic cavitation on a chip reactors. Intern. J. Thermofluids.–2025, Vol. 27, May. 2025.
61. Fang Z., Zhu X., Li J., Yin R., Lu Y., Zheng Zh., Jia J., Dong Zh., Wu Zh. 3D kinematics of cavitation bubbles and the relationship with cavitation intensity in straight-tube ultrasonic microreactors. Chem. Eng. Sci.–2025.– Vol.312, 121700.
62. Caupin F., Herbert E. Cavitation in water: a review. C. R. Physique.–2007.– Vol.7, pp. 1001–1017.
63. Supercritical Fluids. Fundamentals and Applications. /Ed. by Kiran E., Debenedett P.C., Peters C.J. NSSE, Vol. 366, 2000.
64. Samuel, H.S., Nweke-Maraizu U., Etim E.E. Supercritical Fluids: Properties, Formation and Applications. J. Eng. Ind. Res.–2023.–4 (3), pp.176–188.
65. Артеменко С., Крийгсман П., Мазур В. Термодинамическое поведение экологически опасных веществ в сверхкритических природных флюидах. Восточно-европ. журн. передовых технологий. 2009. –Т.42, №6/5.–С. 34–40.

66. Moholkar, V S; Kumar, P S; Pandit, A B. Hydrodynamic cavitation for sonochemical effects. *Ultrason Sonochem.* – 1999.–6(1-2), pp.53–65.
67. Mahulkar A, Pandit AB, Ed. Analysis of hydrodynamic and acoustic cavitation reactors. Saarbrücken, Germany: VDM publishing, 2010.
68. Jagdeep Kumar Nayak., Amol Ganjare, Vivek V. Ranade. A Note on Enhancing Aeration via a Vortex-Based Cavitation Device. ACS Publication (Published by Amer. Chem. Soc.), 2025, 8 pages.
69. Долінський А.А., Авраменко А.О., Іваницький Г.К. Фізичні основи, математичні підходи та технологічні аспекти використання методу ДІВЕ для керування кінетикою протікання нанорівневих процесів в дисперсних та супрамолекулярних системах. *Пром. теплотехника.* 2014. Т. 36, №1. С. 3–17.
70. Islam M.Sh., Aryasomayajula A., Selvaganapathy P.R. A Review on Macroscale and Microscale Cell Lysis Methods. *Micromachines.*–2017.–8(3). pp.83.
71. Kiyama A., Shimazaki T., J Gordillo J.M., Yoshiyuki Tagawa Y. Direction of the microjet produced by the collapse of a cavitation bubble located in a corner of a wall and a free surface. *Phys. Rev. Fluids.*–2021.–6(8), 11 pages.
72. Ding W., Ying D., Hong F., Khan Sh.N., Huang Y., Jia J. Establishment and validation of a multiscale hydrodynamic cavitation model for radical yield: New insights into optimal pressure phenomenon. *Separ.Purif. Techn.*–2025.–379 (3), 135187.
73. Ahmad R., Khodadadi D.A., Abdollahy M., Fan M. Nano-microbubble flotation of fine and ultrafine chalcopyrite particles. *Int. J. Mining Sci. and Techn.*–2014.–24 (4), pp.559–566.
74. Lee A.K., Lewis D.M., Ashman P.J. Microalgal cell disruption by hydrodynamic cavitation for the production of biofuels. *J. Appl. Phycology.*–2015.–27, pp. 1881–1889.
75. Agarwal A., Ng, W.J., Liu Y. Principle and applications of microbubble and nanobubble technology for water treatment. *Chemosphere.*–2011.–84 (9), pp.1175–1180.
76. K. Ando, A.-Q. Liu, C.-D. Ohl. Homogeneous nucleation in water in microfluidic channels. *Phys Rev Lett*, 2012, 109(4), pp. 44–501.

77. Eklund F., Alheshibri M., Swenson J. Differentiating bulk nanobubbles from nanodroplets and nanoparticle. *Current Opin. Colloid & Interf. Sci.* 2021. –Vol. 3, June 2021, 101427.
78. Peng H., Hampton M., Nduen A. Nano-bubbles don not sit alone at the solid liquid interface. *Langmuir*. –2013. –29 (20), pp. 6123–6130.
79. Koshoridze S., Levin Yu.K. Conditions of Nucleation and Stability of Bulk Nanobubbles. *Russian Phys.s J.* –2022. –65(9), pp. 1–8.
80. Chaudhuri J.H., Chatterjee D. Modelling of chemical kinetics in the presence of hydrodynamic cavitation for wastewater treatment applications. *Chem. Eng. Sci.* –2024. –295 (5), 120167.
81. Savchuk L., Znak Z., Kurylets O., Mnykh R., Olenych R. Research into processes of wastewater treatment at plants of meat processing industry by flotation and coagulation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* –2017. –3 (10), pp. 4–9.
82. Прохасько Л.С. Расчет кавитационного устройства для промышленной очистки воды. *Аграрная наука.* – 2023. – № 11. – С. 117–121.
83. Sivakumar M., Pandit A.B. Wastewater treatment: a novel energy efficient hydrodynamic cavitation technique. *Ultrason Sonochem.* – 2002. –9 (3), pp. 123–131.
84. Tandiono T., Kang C.W., Lu X., Turangan C.K., Tan M., Osman H.B., Lim F. An experimental study of gas nuclei-assisted hydrodynamic cavitation for aquaculture water treatment. *Journ. Visualization*, 2020. –23 (5), pp. 863–872.
85. Wang B., Su H., Zhang B. Hydrodynamic cavitation as a promising route for wastewater treatment – A review. *Chem. Eng. J.* –2021. –Vol. 412 (3–4), 128685.
86. Лаврова І.О., Аммар В.С. Дослідження впливу технологічних факторів на ефективність процесу кавітаційної обробки нафтопродуктів. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2013. Vol.6, вип.6 (66), С.43–47.
87. Кравченко О.В., Суворова И.Г., Баранов И.А., Гоман В.А. Перспективные технологии получения и сжигания композиционных топлив на основе методов активации. *Комунальне господарство міст*. – 2014. –118(1). –С. 25–33.

88. Шилін О.О., Коваль О. Д. Використання гідродинамічної кавітації для створення паливних сумішей. Матеріали XVI Міжнар. наук.-техн. конф. молодих вчених та студентів «Інновації молоді в машинобудуванні», Київ, 12-16 трав. 2025 р. / КПІ імені Ігоря Сікорського, Київ, 2025.

89. Maltsev L.I., Podzharov Yu.S. Effect of cavitation treatment of coal-water and composite liquid fuels on their characteristics. *J. Phys. Conf. Ser.*–2022.–1677(1): 012112.

90. Stebeleva O.P., Kashkina L.V., Minakov A.V., Vshivkova O.A. Impact of Hydrodynamic Cavitation on the Properties of Coal-Water Fuel: An Experimental Study. *ACS Omega*.–2022.–7 (42).–pp. 3769–3778.

91. Polyakovs A., Mironovs V., Korjamins A., Andrej Shishkin A., Janis Baronins J. Preparation of coal-water slurry using a high-speed mixer-disperser. *Intern. Conf. Civil Engineering*. 2013, June. Jelgava, Latvia. Vol.4, 5 p.

92. Юницкий А. Э., Першай Н.С., Арнаут С.А. Использование электрогидроудара в технологии приготовления водоугольного топлива. Сб. ст. Эффективность инженерных систем и энергосбережение.– Брест: БрГТУ, 2023.– С. 127–135.

93. Fesenko A., Yevsiukova F., Basova Ye., Ivanova M., Ivanov V. Prospects of Using Hydrodynamic Cavitation for Enhancement of Efficiency of Fluid Working Medium Preparation Technologies. *Periodica Polytechnica Mech. Eng.*–2018.–62 (4), pp. 269–276.

94. Obodovych O.M., Ivanytsky G.K., Tselen B.Ya., Radchenko N.L., Nedbailo A.Y, Shulyak V.V. (2022). Mathematical simulation of fuels production processes, based on water-oil emulsion by hydrodynamic cavitation method. *Modern engineering and innovative technologies*, 2022, (24-01), 47–55.

95. Orthaber, U.; Zevnik, J.; Petkovšek, R.; Dular, M. Cavitation bubble collapse in a vicinity of a liquid-liquid interface – Basic research into emulsification process. *Ultrason. Sonochemistry*. 2020, 68, 105224.

96. Ramisetty, K. A.; Pandit, A. B.; Gogate, P. R. Novel Approach of Producing Oil in Water Emulsion Using Hydrodynamic Cavitation Reactor. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2014, 53 (42), 16508–16515.

97. Андреев М.С., Столяренко Г.С. Застосування явища кавітації і кавітаційного реактору для інтенсифікації процесу естерифікації. *Вісник Східноукр. нац. ун-ту імені Володимира Даля.*—2025.— № 1 (287), С.57–66.

98. Panahi Y., Farshbaf M., Mohammadhosseini M., Mirahadi M., Khalilov R., Saghfi S., Akbarzadeh A. Recent advances on biotec nanoparticles: synthesis, characterization and biomedical applications. *Artif. Cells Nanomed Biotechnol.*—2017.— 5(4), 788–799.

99. Fedorov K., Cako E., Dinesh K., Soltani R.D.Ch., Wang Zh., Ali Khan J., Boczkaj G. . Cavitation-Based Processes for Water and Wastewater Treatment. Chapter in: Nasr, M., Negm, A.M. (eds) *Cost-efficient Wastewater Treatment Technologies. The Handbook of Environmental Chemistry.* Springer, Cham.—2022.— Vol 118, pp.331–377.

100. Albanese L. The Venturi Reuleaux Triangle: Advancing Sustainable Process Intensification Through Controlled Hydrodynamic Cavitation in Food, Water, and Industrial Applications. *Sustainability* 2025, 17(15), 6812.

101. Mancosky D.G., Milly P. Controlled Cavitation for Scale-Free Heating, Gum Hydration and Emulsification in Food and Consumer Products. //In book: *Ultrasound Technologies for Food and Bioprocessing*, H. Feng et al. (eds.), Springer Science+Business Media, LLC 2011,Chapter 8, pp. 191–210.

102. Myronchuk V., Obodovych O., Stepanova O., Gavva O., Volodin S., Tselen B. Discrete-pulse energy input method for preretreatment of corn stalk in bioethanol production, *Ukrainian Food Journal.*—2025.—14(2), pp. 342–353.

103. Asaithambi N., Singha P., Dwivedi M., Singh S.K. Hydrodynamic cavitation and its application in food and beverage industry: A review. *J. Food Process Eng.*—2019.— 42 (5), 14 pages.

104. Drożdziel P., Vitenko T., Voroshchuk V., Narizhnyy S., Snizhko O. Discrete-Impulse Energy Supply in Milk and Dairy Product Processing. *Materials* 2021, 14, 4181. 22 p.
105. Crudo, D.; Bosco, V.; Cavaglia, G.; Mantegna, S.; Battaglia, L.; Cravotto, G. Process Intensification in the food industry: Hydrodynamic and acoustic cavitation in fresh milk treatment. *Process intensification. Agro Food Ind. Hi Tech* 2014, 25, 55–59.
106. Гніцевич В. А., Гончар Ю. М., Романенко Р. П. Дослідження мікроструктури продуктів переробки молочної сироватки. Прогресивні техніка та технології харчових виробництв. 2019. Вип. 2(30), С. 72–83.
107. Іваницький, Г., Целень, Б., Радченко, Н. Використання гідродинамічної кавітації для підвищення ефективності процесу кристалізації лактози в молочній сироватці. *Наукові праці ОНТУ*, 2022.–86(1), С. 11–16.
108. Долинский А.А., Шурчкова Ю.А., Иваницкий Г.К., Целень Б.Я. Оптимизация тепломассообменных и гидродинамических процессов в технологии термовакuumной обработки молока. *Наука та інновації*.–2010. – Т.6, №1.–С. 59–69.
109. Meneguzzo F., Albanese L., Zabini F. Hydrodynamic Cavitation in Beer and Other Beverage Processing. In book: *Ref. Module in Food Sci.*, HCT-agrifood Lab.
110. Знак З.О., Сухацький Ю.В., Мних Р.В. Дослідження залежності ефективності роботи гідродинамічного струменевого кавітатора від конструктивних параметрів кавітувального елемента. *Вібрації в техніці та технологіях*.–2015.–№ 2 (78), С. 18–26.
111. Климов Р.А Оптимизация режимных характеристик процесса дробления дисперсной фазы. *Матем. моделир*.–2010.–№ 2 (23), С. 63–65.
112. Анісімов В.В., Єрмаков П.П. Дослідження процесу кавітації в зануреному соплі. *Вісник Черніг. ДТУ*.–2013. –№2 (65), С. 47–54.
113. Chisti Yu., Moo-Young M. Disruption of microbial cells for intracellular products. *Enzyme Microb. Technol.*–1986.–8 (4), pp. 194–204.
114. Sawant S.S., Anil A.Ch., Krishnamurthy V., Gaonkar Ch., Kolwalkar J., Khandeparker L., Desai D., Mahulkar A.V., Ranade V.V., Pandit A.B. Effect of

hydrodynamic cavitation on zooplankton: a tool for disinfection. *Biochem. Eng. J.* –2008.–42(3), 320–328.

115. Capocelli M., Prisciandarob M., Lanciac A., Musmarraa D. Comparison between hydrodynamic and acoustic cavitation in microbial cell disruption. *Chem. Eng.* –2014. – 38, 6 pages.

116. Mancuso, G., Langone, M. & Andreottola, G. A critical review of the current technologies in wastewater treatment plants by using hydrodynamic cavitation process: principles and applications. *J Environ Health Sci Engineer.* –2020. – Vol.18, pp.311–333.

117. Ivanitsky G.K., Avdeyeva L.Y., Makarenko A.A. Using the effects of hydrodynamic cavitation for purposeful dynamical action on the supramolecular structures. *Фізика аеродисперсних систем.* – 2017. –№53, С.142–151.

118 Chaudhuri A., Gogate P.R., Mahulkar A., Pandit A.B. Modeling of hydrodynamic cavitation reactors based on orifice plates considering hydrodynamics and chemical reactions occurring in bubble. *Chem Eng J.*–2008.–143 (1–3), pp. 201–209.

119. Gore M.M., Saharan V.K., Pinjari D.V., Chavan P.V., Pandit A.B. Degradation of reactive orange 4 dye using hydrodynamiccavitation based hybrid techniques. *Ultrason Sonochem* –2014.–Vol.21, pp. 1075–1082.

120. Moholkar V.S. Mathematical models for sonochemical effects induced by hydrodynamic cavitation. *Handbook of Ultrason. and Sonochem.*, M. Ashokkumar, (ed.), Springer Science, Singapore.–2015.– 48 pages.

121. Golshaei R., Davoudian S.H., Toyran E., Kestek E., Kaur A., Priyadarshi A., Koşar A., Tzanakis Ia., Ghorbani M. Novel concept of hydroxyl radical generation in hydrodynamic cavitation on a chip. *Chem. Eng. J.*–2025.–Vol. 517, 164356.

122. Li J., Cheng P. Bubble cavitation in a microchannel. *Int. J. Heat and Mass Transfer.*–2004.–47 (12–13), pp. 2689–2698.

123. Perrin L., Colombet D., Ayela F. Comparative study of luminescence and chemiluminescence in hydrodynamic cavitating flows and quantitative determination of hydroxyl radicals production. *Ultrason. Sonochem.*–2021. –70 (1), pp. 1–9.

124. Oliveira G.L., Hsiao Ch.-Ts., Choi J.-K. A numerical study of cavitation inception in complex flow fields. Dynaflow Inc, 2007, 167 pages.

125. Котухов А. В., Жарко Н. А., Минчук В. С., Дежкунов Н. В. Кавитация в водных растворах углекислого газа. ПФМТ (Проблемы физики, математики и техники).—2019. – № 4 (41), 4, С. 17–22.

126. Kowalski K., Pollak S., Hussong J. Experimental investigation of cavitation induced air release. The European Physical Journal Conferences. –2017. –143(5):02054, 5 pages.

127. Шаталов В.М. Дегазация биожидкостей как механизм биологического действия слабых электромагнитных полей. Вісн. Харк. нац. ун-ту. Біофіз. вісн.—2009.—23 (2). С. 120–127.

128. Dingkang Xia, Jianhua Wu, Kunpeng Su. Classification of regimes determining ultrasonic cavitation erosion in aqueous solutions containing dissolved air. Ultrason. Sonochem.—2025.—Vol. 116, May, 107324.

129. Raut J.S., StoyanovS.D., DuggalCh., Pelan E.G., Arnaudov L.N., Naik V.M. Hydrodynamic cavitation: a bottom-up approach to liquid aeration. Soft Matter.—2012.—8, pp. 4562–4567.

130. Nedbailo A.Ye., Ivanitsky G.K., Tselen B.Ya, Obodovych O.M., Radchenko N.L. Evaluation of the efficiency of liquid degassing technology based on the principle of hydrodynamic cavitation. Acta Periodica Technologica, 2023 (54): 237–244.

131. Chung L.T., Melikhov V.I., Melikhov O.I., Yakush S.E. Collapse of a hot vapor bubble in subcooled liquid. J. Physics: Conference Series.—2020.—1652, 12018.

132. Tang J., Sun L., Liu H., Liu H. Mo Zh. Review on direct contact condensation of vapor bubbles in a subcooled liquid. Exp. Comput. Multiph. Flow.—2022.—4, pp. 91–112.

133. Hayashi K., Hosokawa Sh., Tomiyama A. Hydrodynamic sound generated by collapse of vapor bubbles in subcooled liquid flow. Multiphase Sci. Techn.—2019.—31 (1), pp. 61–71.

134. Chan C.K. Dynamical Pressure Pulse in Steam Jet Condensation. Sixth Intern. Heat Transfer Conf.—Toronto.—1978.—Vol.2, pp. 395–400.
135. Иваницкий Г.К. Наномасштабные эффекты в процессах кавитации. I. Паровая кавитация. Пром.теплотехника.— 2003.—Т.25, №4.—С.15–20.
136. Berthoud G.Vapor Explosions. Annual Review of Fluid Mechanics.—2000.—32(1) pp. 573–611.
137. Hwang M., Kim H.-D. Steam Explosion Studies Review. KAERI.—1999.—534/99, 71 p.
138. Домашев Е.Д., Шрайбер А.А. Организация в Украине комплексных исследований аэрогидродинамический теплофизических и физико-химических процессов при запроектной аварии ядерного реактора. Пром. теплотехника.—1998.—20 (6) С.51–58.
139. Домашев Е.Д., Ковецкая М.М., Колочко В.Н. Некоторые проблемы верификации результатов расчета теплофизических процессов в циркуляционном контуре ЯЭУ при моделировании аварийных режимов. Пром. теплотехника.—1999.—Т.21, №7.—С.107–110.
140. Corradini, M.L., Taleyarkhan, RP Vapor explosions: A review of experiments for accident analysis. J. Nuclear Safety.—1991.—32(3), pp. 337–362.
141. Гаврилов П.М., Кузьмин А.В. Расчет динамики поверхностных пузырьков в процессах с аварийной разгерметизацией ядерного реактора. Труды III Минского международного форума по тепломассообмену (Тепломассообмен ММФ-92).—Том.4.— Минск: ИТМО АНБ.— 1992.— С.88–91.
142. Bjorge R.W., Griffith P. Initiation of Waterhammer in Nearly Horizontal Pipes Containing Steam and Subcooled Water. J. Heat Transfer.—1984.—106(4), 6 pp.
143. Ramamurthi K., Sumil Kumar S. Collapse of vapor locks by condensation over moving soobcooled liquid. Int. J. Heat Mass Transfer.—2001.—44 (6), pp. 2983–2994.
144. Chen L.-D., Faeth G.M. Condensation of Submerged Vapor Jets in Subcooled Liquid. Trans. ASME J.Heat Transfer.—1982.—10 (4), pp. 179–187.

145. Simpson M.E., Chan C.K. Hydrodynamics of a Subsonic Vapor Jet in Subcooled Liquids. *J.Heat Transfer.*–1982.–10 (4), pp. 271–278.
146. Юткин Л.А. Электрогидравлический эффект.–М.: Маш. изд. 1955.–52 с.
147. Кривицкий Е.В. Динамика электровзрыва в жидкости. Киев: Наукова думка, 1987. 208 с.
148. Поздеев В.А. Прикладная гидродинамика электрического разряда в жидкости. Киев: Наукова думка, 1980. –1942 с.
149. Qu T., Zhou M., Luo J., Xu W., Bai L., Zhai Y., Jie Li J. Characteristics of evolution and collapse in spark-induced cavitation bubbles. *Physics of Fluids.* 2024. 36, 044117.
150. Трофимов И., Зубченко А., Максимов С., Коломиец Г. Исследование поведения диэлектрических жидкостей в сильных электрических полях. *Труды Национального авиационного университета.* 2013, 54 (1), 88–93.
151. Bourgeois J., Savard J., Buron J.-D., Houde S. Parametric assessment of size and peak pressure variability for cavitation bubbles induced by low-voltage discharge. *J. Fluids Eng.*–2025.–147 (5), 1–32.
152. Мазуровский Б.Я., Сизёв А.Н. Электрогидравлический эффект в листовой штамповке. – Киев: Наукова думка, 1983.–192 с.
153. Liu B., Wang D, Guo Y., Influence of water conductivity on shock waves generated by underwater electrical wire explosion. *Phys. Lett. A.*– 2018.–382 (1), p. 49–54.
154. Смирнов А.П., Жекул В.Г., Хвощан О.В. Инициирование электрического разряда в воде тонкослойным проводником. *Электр. обраб. материалов.*–2021.–57(2), 15–24.
155. Кузнецова Е.Г., Сарибекова Ю.Г. Влияние электроразрядной обработки на очистку сточных вод в процессах коагуляции и флокуляции. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий.*–2011.–4/5 (52), С. 50–53.
156. Ризун А.Р., Голень Ю.В. Электроразрядное изготовление водно-угольной суспензии (ЭРВУС). *Сб. Современная наука.*–2012.– 3(1).–19–23.

157. Ермагамбет Б.Т., Нургалиев Н.У., Касенова Ж.М., Зикирина А.М., Абылгазина Л.Д. Эффективность использования кавитационного диспергирования угольной суспензии для получения гуминовых удобрений. Наука, техника и образование.–2017.–10 (28), С. 37–39.

158. Berdishev A.S., Turdibayev A.A., Aytbayev N.A., Sobirjonov N.U. Electrohydraulic liquid disinfection and efficiency evaluation in various modes Intern. Scient. on-line conf. “Innovation in the modern education system”, Part 30 May 2023, Collections of scientific works. USA, Washigton, 2023.

159. Vogel A., Lauterborn W., Timm R. Optical and acoustic investigations of the dynamics of laser-produced cavitation bubbles near a solid boundary J.Fluid Mech.–1989, Vol. 206, pp. 299–338.

160. Ангельский О. В., Бекшаев А. Я., Максимьяк П. П., Максимьяк А. П., Контущ С. М. Лазерно-индуцированная управляемая генерация микропузырьков в водной суспензии поглощающих коллоидных частиц. Фізика аеродисперсних систем 2017.–№53, С.164–177.

161. Wen H., Sun Yu., Geng S., Yao Zh., Zhong Q. Experimental study of laser-induced bubble collapse near a rigid wall based on the double-exposure method. Int. J. Fluid Eng.–2025.–2 (1), 014302.

162. Tong Qu, Maolin Zhou, Jing Luo, Weilin Xu, Lixin Bai, Yanwei Zhai, Jie Li. Characteristics of evolution and collapse in spark-induced cavitation bubbles. Physics of Fluids.–2024. Fluids.–36 (4), 044117.

163. Sagar H., Moctar O. Numerical simulation of a laser-induced cavitation bubble near a solid boundary considering phase change. Ship Techn. Res. 2018. 65 (3). pp. 163–179.

164. Gebensleben D., Reuter F., Ohl C.-D. Single cavitation bubble dynamics in a confined planar flow. Int. J. Multiphase Flow.–2025.– 3 April 105224.

165. Иваницкий Г.К., Недбайло А.Е. Аналитическое исследование кавитации в рабочем колесе центробежных насосов. Пром. теплотехника. – 2012. – Т. 34, № 2. – С. 40–47.

166. Timouchev S., Panaiotti S., Knyazev V., Soldatov V. Validation of numerical procedure for assessment of centrifugal pump cavitation erosion Proc. XXV Intern. Pump Users Sympos. – 2009. – Texas, p. 39–48.

167. Новохатній В.Г., Усенко І.С., Казидуб Ю.В. Ліквідація кавітації в насосах водопровідної насосної станції. Тези 76-ї наукової конференції університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка». Т.1 (14–23 травня 2024 року) – Полтава: Нац. університет імені Юрія Кондратюка, 2024.–С. 183–184.

168. Milly P.J., Toledo R.T., Kerr W.L., Armstead D., Hydrodynamic cavitation: Characterization of a novel design with energy considerations for the inactivation of *Saccharomyces cerevisiae* in apple juice. J. Food Sci.–2008. –Vol. 73, pp. 298–303.

169. Stryczek J., Antoniuk P., Banas M., Stryczek P., Jakhno O., Luhovskyi O., Gryshko I. Physical fundamentals of ultrasonic degassing. Bulletin of the National Technical University "KhPI". Ser.A : Hydraulic machines and hydraulic units : 36. наук. праць. – Харків : НТУ "ХПІ", 2021– № 1.– С. 17–22.

170. Xue L., Ren W., Liu J., Liu G., Wang Ye., Haiyan Bie H., Hao Z. Effect of structural parameters on cavitation performance of a novel counter-rotating hydrodynamic cavitation reactor for seawater pre-treatment. Desalination.–2025.–Vol.610(1), 118927.

171. Ahuja V., Hosangadi A. Simulations of Cavitation in Orifice and Venturis. Proc. ASME PVP 2007 / CREEP 8-11 Conf. – Hyatt Regency San Antonio, Texas (USA), 2007. – 9 p.

172. Arrojo S., Benito Y. A theoretical study of hydrodynamic cavitation. Ultrason. Sonochemistry.–2008.–15 (3), pp. 203–211.

173. Carpenter J., Badve M., Rajoriya S., George S., Saharan V.K., Pandit A.B. Hydrodynamic cavitation: an emerging technology for the intensification of various chemical and physical processes in a chemical process industry Reviews in Chem. Engng.–January, 2017.–pp.1–37.

174. Ai W.-Zh., Ding T.-M. Orifice Kubina its influencing factors. Water Sci. Engineering. – 2010. – 3(3), pp.321–330.

175. Moholkar V.S., Pandit A.B. Modeling of hydrodynamic cavitation reactors: a unified approach. *Chem. Eng. Sci.*–2001 Vol. 56, No 21–22.–pp. 6295–6302.

176. Simpson A., Ranade V.V. Modeling hydrodynamic cavitation in venturi: influence of venturi configuration on inception and extent of cavitation. *AIChE.J.* – 2019. – Vol.65, pp. 421–433.

177. Вітенько Д.О., Вітенько Т.М. Аналіз та порівняння гідродинаміки потоку у кавітаційних апаратах. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*, 2024.–14(2). С. 1–15.

178. Simpson A., Ranade V.V. Modelling of hydrodynamic cavitation with orifice: Influence of different orifice designs. *Chem. Eng. Research and Design.* –2018. –Vol. 136, pp. 698–711.

179. Zima P., Maršík F., Sedlář M.. Cavitation Rates in Water with Dissolved Gas and Other Impurities. *Journal of Thermal Science.* 2003. –12 (1), pp. 151–156.

180. Patil Parag R. and Pandit Aniruddha B. Hydrodynamic cavitation reactors: A state of the art review. *Reviews in Chemical Engineering.*–2001.–Vol. 17, No 1.–pp.1–85.

181. Ozonek J., Lenik K. Effect of different design features of the reactor on hydrodynamic cavitation process. *Archives of Materials Sci. and Engineering.* –2011. – 52(2), 112–117.

182. Sharma A., Gogate P.R., Mahulkar A., Pandit A.B. Modeling of hydrodynamic cavitation reactors based on orifice plates considering hydrodynamics and chemical reactions occurring in bubble. *Chem Eng J.*–2008.–143 (1–3), pp. 201–209.

183. Rudolf P., Kubina D., Hudec M., Kozák J., Maršálek B., Maršálková E., Pochylý F. Experimental investigation of hydrodynamic cavitation through orifices of different geometries. *EPJ Web Conf*, 143 (2017), p. 143.

184. Sivakumar M., Pandit A.B. Wastewater treatment: a novel energy efficient hydrodynamic cavitation technique. *Ultrason Sonochem.*– 2002.–9 (3), pp. 123–131.

185. Gallo M., Casciola C.M. Vapor bubble nucleation in flowing liquids. *Int. J. Multiphase Flow.* –2024. – Vol.179, 104924.

186. Iben U, Makhnov A., Schmidt A. Numerical Investigation of Cavitating Flows with Liquid Degassing. IOP Conf. Series: J. Physics.–2018.–1038, pp. 1–6.
187. Albanese L. The Venturi Reuleaux Triangle: Advancing Sustainable Process Intensification Through Controlled Hydrodynamic Cavitation in Food, Water, and Industrial Applications. Sustainability. – 2022. –17(15), 68–74.
188. Zeman R., Rudolf P. Hydrodynamic cavitation in minifluidic Venturi nozzle. EPJ Web of Conf. –2024. –Vol. 299, pp.149.
189. Albanese L. The VRA (Reuleaux) Geometry in Hydrodynamic Cavitation. Preprints.org, Creative Commons CC BY 4.0. Albanese L. The VRA (Reuleaux) Geometry in Hydrodynamic Cavitation. Preprints.org, Creative Commons CC BY 4.0. – 2025. – 6 pages.
190. Qin L., Widyatama A., Zhang N., Passos J.C., Sefiane K., Li S., Orejon Mantecon D. Addressing the synergistic effect of hydraulic diameter and aspect ratio on experimental flow boiling in microchannels. Applied Thermal Engineering (Edinburgh Research Explorer).–2025.– 126566.
191. Gunaseker A.S., Duke D. The influence of dissolved gas on the cavitation dynamics within a round nozzle. Intern. J.. Multiph. Flow.–2025.–Vol. 193, 105390.
192. Rooze J., Andre M., van der Gulik G.-J., Fernandez-Rivas D., Gardeniers J.G., Rebrov E.V., Schouten J.S., Keurentjes J.T.F. Hydrodynamic cavitation in micro channels with channel sizes of 100 and 750 micrometers. Microfluid Nanofluid.–2012.–12 (1), pp. 499–508.
193. Mishra Ch., Peles Y. Flow visualization of cavitating flows through a rectangular slot micro-orifice ingrained in a microchannels. Physics of Fluids. –2005. – Vol.17 (11), pp. 174–185.
194. Ayela F., Cherie W., Colombet D., Ledoux G., Martin M., Mossaz S., Podbevsek D., Qiu X., Tillement O. Hydrodynamic Cavitation through “Labs on a Chip”: From Fundamentals to Applications. Oil & Gas Sci. Technol. –2017. –Vol.72 (4), 19 pages.

195. Rachman M.N.F., Rhakasywi D., Fahrudin. Numerical Study of Cavitation Phenomenon in a Venturi Tube. *Journ. La Multiapp.*–2024.–Vol.5, Issue 4.–pp. 453–464.
196. Allami S., Lay E.N., Atharifar M., Oud A. Simulation and optimization of Venturi type bubble generator to improve cavitation. *Chem. Prod.Process Modeling.* – 2025. –20 (1). 159–173.
197. Washio S., Fujiyoshi S., Takahashi S. Observation of cavitation inception in separating water flows through constricted channels. *Proceed. Inst. Mech. Engineers.*–2009.–223(9), pp. 2071–2080.
198. Gireesan S., Pandit A.B. Modeling the effect of carbondioxide gas on cavitation. *Ultrason. Sonochem.*–2017.–Vol. 34. – pp. 721–728.
199. Bashir TA, Soni AG, Mahulkar AV, Pandit AB. The CFD driven optimization of a modified venturi for cavitation activity. *Can JChem Eng* 2011; 89: 1366–1375.
200. Li M., Bussonnière A., Bronson M., Xu Zh., Liu O. Study of Venturi tube geometry on the hydrodynamic cavitation for the generation of microbubbles. *Minerals Engineering.* 2019 132, P. 268–274.
201. Long X.P., Wang J. Experimental investigation of the instability of cavitation in venturi tube under different cavitation stage. *J. Mech. Eng.*–2018.–54(2), 209–215.
202. Анісімов В.В., Єрмаков П.П. Експериментальне дослідження інтенсивності кавітації в соплі Вентурі. *Наук. праці ОНАХТ.*–2015.–47 (1), С. 171–173.
203. Liu C., Ao D., Li X., Li Yu. Numerical Simulation of High-pressure Cavitation Characteristics of Thick Orifice Plate. *J. Pipeline Sci. Eng.*–2025.–100365.
204. Yan Y., Thorpe R.B. Flow regime transitions due to cavitation in the flow through an orifice. *Intern. J. Multiphase Flow.*–1990.–16 (6), pp. 1023–1045.
205. Lee G.H., Lee Y.K. Preliminary CFD Analysis for the Rotating Cavitation Flow inside a Centrifugal Pump. *Trans. Korean Nuclear Society Spring Meeting Jeju, Korea, May 9–10, 2024.*
206. Wang Y., Shao J., Zhang H. Analysis of the effect of cavitation on internal fluid excitation characteristics of centrifugal pumps. *Physics of Fluids*– 2024.–36, 082104.

207. Wang Y., Lei J., Chen J., Wang X., Li M. Investigation of typical cavitation flow field characteristics in a centrifugal pump. *Comp. Part. Mech.*–2025.–12, pp. 1291–1307.
208. Krella A.K. Degradation and Protection of Materials from Cavitation Erosion: A Review. *Materials.*– 2023.–16(5), 2058.
209. Petkovšek M., Zupanc M., Dular M., Kosjek, Heath E., Kompare B., Širok B. Rotation generator of hydrodynamic cavitation for water treatment. *Separation and Purification Separation and Purification Technology.*– 2013.–Vol.118, 30. pp. 415–423.
210. Licheng Xue, Jinhan Liu, Gang Liu, Yue Wang, Wanglong Ren, Haiyan Bie, Zongrui Hao. An investigation on cavitation mechanism induced by interaction between stator and rotor of cylindrical rotational hydrodynamic cavitation reactor. *Chem. Eng. Sci.*–2025. –Vol. 306.–121314.
211. Petkovšek, M. Mlakar, M. Levstek, M. Stražar, B. Širok, M. Dular, A novel rotation generator of hydrodynamic cavitation for waste-activated sludge disintegration. *Ultrason. Sonochemistry* 2015. –Vol.26, pp. 408–414.
212. Kim H., Koo B., Lee S., Yoon J.Y. Experimental study of cavitation intensity using a novel hydrodynamic cavitation reactor. *J Mech Sci Technol.* 2019. 33, 4303–4310.
213. Liu H., Yu J. Investigation on stacked cavitation in rotational hydrodynamic cavitation reactor with a tapered rotor. *Chem. Eng. J.*–2025.–Vol. 517, 164–175.
214. Xia G., Manickam S., Yoon J.Y., Boczkaj G., Wang W., Wang B., Sun X. Technological advances and applications of rotational hydrodynamic cavitation reactors for process intensification: A comprehensive review. *Chem. Eng. J.*–2025, 8 pages.
215. Долинский А.А., Иваницкий Г.К., Ободович А.Н. Использование механизмов ДИВЭ при роторно-пульсационной обработке гетерогенных сред. *Пром. теплотехника.*–2008.–Т.30, № – С.5–13.
216. Долинский А.А., Басок Б.И. Роторно-импульсный аппарат. 1. Импульсные эффекты локального адиабатического вскипания и кавитации в жидкости. *Промышленная теплотехника.* 1998. Т.20, №7. С. 7–10.

217. Червяков В.М., Юдаев В.Ф. Гидродинамические и кавитационные явления в роторных аппаратах : монография. – М. : Машиностроение-1", 2007. 128 с.
218. Пляцук Л.Д., Шапорев В.П., Моисеев В.Ф., Манойло Е.В. Питак И.В., Васильев М.И., Васькин Р.А. Основы гидродинамики и массопереноса в роторных массообменных аппаратах. –Харьков: НТУ "ХПИ", –Сумы: СумГУ.– 2013.–177 с.
219. Давиденко Б.В. Теплообмен, гидродинамика и процессы диспергирования в роторно-пульсационных и моногрануляционных аппаратах: Дис. д.т.н., 05.14.06– Киев 2009. – 365 с.
220. Авдеева Л.Ю., Иваницкий Г.К. Применение гидродинамической кавитации в технологическом процессе получения фосфолипидных наноструктур. Сб. науч. статей “Современная наука”. 2011. № 2 (7). С.52–58.
221. Басок Б.И., Давыденко Б.В., Кравченко Ю.С., Кремнев В.О., Пироженко И.А. Особенности гидродинамики роторно-пульсационных аппаратов дискового типа. Пром. теплотехника.–2003.–25 (3), С. 21– 25.
222. Xue L., Liu J, Liu G., WangY., Ren W., Bie H., Hao Z. An investigation on cavitation mechanism induced by interaction between stator and rotor of cylindrical rotational hydrodynamic cavitation reactor. Chem. Eng. Sci.–2025. –Vol. 306, 121314.
223. Washio S. Takahashi, K. Murakami, T. Tada, S. Deguchi. Cavity generation by accelerated relative motions between solid walls contacting in liquid. Proceedings of the Institution of Mechan. Engineers, Part C: J. Mech.Eng. Sci.–2008.–Vol.222, 1695–1705.
224. Ashokkumar M., Rink R., Shestakov S. Hydrodynamic cavitation – an alternative to ultrasonic food processing. Electronic J. «Technical Acoustics».–2011, 10 pages.
225. Milly P.J., Toledo R.T., Harrison M.A., Armstead D. Inactivation of food spoilage microorganisms by hydrodynamic cavitation to achieve pasteurization and sterilization of fluid foods. J. of Food Science, 72 (2007) M414–M422.
226. Іваницький Г., Целень Б., Радченко Н. Використання гідродинамічної кавітації для підвищення ефективності процесу кристалізації лактози в молочній сироватці. Наукові праці ОНТУ, 2022.–86(1), С. 11–16.

227. Belovolova L.V., Glushkov M.V., Vinogradov E.A. Fundamental microheterogeneity of dilute aqueous media. The role of active oxygen species and gas bubbles. Proceed. V Intern. Congress «Low and superlow fields and radiations in biology and medicine», SPb, 2009. –pp. 10–23.
228. Jangir N., Diwedi P., Ghosh S. Design of a hydrodynamic cavitating reactor. Chem. Eng. Processing: Process Intensif. –2017. –122, pp. 128–142.
229. Ободович О.М., Целень Б.Я., Степанова О.Є., Недбайло А.Є., Булій Ю.В. Дослідження реологічних показників водомазутних емульсій в залежності від технічних засобів та технологічних параметрів їх приготування. Енерготехнології та ресурсебереження.–2025.–83(2), С. 34–39.
230. Long M., Goldsmith H.L., Tees D.F.J., Zhu Ch. Probabilistic Modeling of Shear-Induced Formation and Breakage of Doublets Cross-Linked by Receptor-Ligand Bonds. Biophys. J.–1999.– Vol. 76, February.–pp.1112–1128.
231. Bernasconi M.C. Condensate Neutralizer: United States Patent Application Publication. U.S. Patent 2020/0103141 A1, 2 April 2020.
232. Horák J., Kuboňová L., Dej M., Ryšavý J., Bajer S., Kysučan Z., Ulrich P., Mareček P., Tesař F., Garba M., Hopan F., Praus P. Long-Term Neutralization of Acidic Condensate from Gas Condensing Boilers. Sustainability. –2022.–Vol.14, 15015.
233. Harrold D.E., Baumann E.R. Characterization and treatment of condensates from high efficiency appliances. Water Research.–1985.–13 (5), pp. 627–638.
234. Thormann E., Dreyer J.K., Simonsen A.C., Hansen P.L., Hansen S., Holmskov U., Mouritsen O.G. Dynamic Strength of the Interaction between Lung Surfactant Protein D (SP-D) and Saccharide Ligands. Biochemistry.–2007.– Vol. 46, pp.12231–12237.
235. Rooze J., Andre M., van der Gulik G.-J., Fernandez-Rivas D., Gardeniers J.G., Rebrov E.V., Schouten J.S., Keurentjes J.T.F. Hydrodynamic cavitation in micro channels with channel sizes of 100 and 750 micrometers. Microfluid Nanofluid.–2012.–12 (1), pp. 499–508.
236. Kumar P.S., Kumar M.S., Pandit A.B. Experimental quantification of chemical effects of hydrodynamic cavitation. Chem. Eng. Sci. –2000.–55 (9), pp. 1633–1639.

237. Arrojo S, Nerin C, Benito Y. Application of salicylic acid dosimetry to evaluate hydrodynamic cavitation as an advanced oxidation process. *Ultrason Sonochem*, 2007, 14: 343–349.
238. Amin L.P., Gogate P.R., Burgess A.E., Bremner DH. Optimization of a hydrodynamic cavitation reactor using salicylic acid dosimetry. *Chem Eng J*, 2010, 156(1): 165–169.
239. Han B., Köhler K., Jungnickel K., Mettin R., Lauterborn W., Voge A. Dynamics of laser-induced bubble pairs. *J. Fluid Mech.*—2015.—Vol. 771, pp. 706–742.
240. Wen H., Sun Yu., Geng S., Yao Zh., Zhong Q. Experimental study of laser-induced bubble collapse near a rigid wall based on the double-exposure method. *Int. J. Fluid Eng.*—2025.—2 (1), 014302.
241. Vogel A., Lauterborn W., Timm R. Optical and acoustic investigations of the dynamics of laser-produced cavitation bubbles near a solid boundary *J. Fluid Mech.*—1989, Vol. 206, pp. 299–338.
242. Kiyama A., Shimazaki T., J Gordillo J.M., Yoshiyuki Tagawa Y. Direction of the microjet produced by the collapse of a cavitation bubble located in a corner of a wall and a free surface. *Phys. Rev. Fluids.*—2021.—6(8), 11 pages.
243. Brujan E. A., Keen G. S., Vogel A., Blake J. R. The final stage of the collapse of a cavitation bubble close to a rigid boundary. *Phys. Fluids.* —2002. — 14 (1), pp/ 85–92.
244. Gregorčič P., Petkovšek R., Možina J. Investigation of a cavitation bubble between a rigid boundary and a free surface. *J. Appl. Phys.*—2007.—Vol.102, pp. 4904–4911.
245. Dular M., Širok B., Stoffel B. The Influence of the Gas Content of Water and the Flow Velocity on Cavitation Erosion Aggressiveness. *Journal of Mechanical Engineering*, 2005. —Vol.51(3), pp. 132–145.
246. Vitenko T., Drożdżiel P., HorodyskyI N. Erosive impact of vapor-gas phase on the working surface in hydrodynamic type cavitation mode. *Diagnostyka.*—2016.—17 (1), pp. 3–8.

247. Verhulst T., Judt D., Lawson C., Al-Tayawe O., Ward G., Chung Y. Pump Health Monitoring Test Environment for Diagnosing the Erosive Effects from Cavitation. *Int. J. Progn. & Health Manag.*—2025.—16 (1), pp.1–23.

248. Mohammadizadeh S.; Dalfré Filho J.G.; Sampaio Descovi C.; Genovez A.I.B.; Teixeira Buttignol T.E. Experimental Analysis of Cavitation Erosion: Parameter Sensitivity and Testing Protocols. *Coatings.* —2024.—14 (10), 1288.

249. Gao G., Guo Sh., Li D. A Review of Cavitation Erosion on Pumps and Valves in Nuclear Power Plants. *Materials.*—2024.—17(5), 1007–1021.

250. Кутовий М.С., Тарасенко Т.В., Макаренко Р.О. Ерозійна стійкість конструкційних матеріалів у кавітаційних струменях газонасиченої рідини. Матеріали XVI Міжнар. наук.-техн. конф. молодих вчених та студентів «Інновації молоді в машинобудуванні», м. Київ, 12-16 трав. 2025 р. / КПП імені Ігоря Сікорського, Київ, 2025.

251. Pavlovic M., Dojcinovic M., Prokic-Cvetkovic R., Andrić L., Ceganjac Z. Trumbulović L. Cavitation Wear of Basalt-Based Glass Ceramic. *Materials.* 2019. 12(9), 1552.

252. Yang Liu Y., He X., Huang C., Zhang J. Interaction dynamics between cavitation bubbles and compressible air bubbles in an infinite domain. *Int. J. Heat Mass Trans.*—2025. —Vol.249, 127214.

253. Plesset M.S., Prosperetti A. Bubble dynamics and cavitation. *Ann. Rev. Fluid Mech.* — 1977. — Vol.24. — P.145–185.

254. Plesset M.S., Zwick S.A. The growth of vapor bubbles in superheated liquids. *J. Appl. Phys.*—1954.—25(4), pp. 4243–500.

255. Noltingk B.E., Neppiras E.A. Cavitation produced by ultrasonics. *Proc.Phys. Soc.* 1950, Vol.63 B, pp. 674–685.

256. Neppiras E.A., Noltingk B.E. Cavitation produced by ultrasonics: theoretical conditions for the onset of cavitation. *Proc Phys Soc*, 1951, B 64:1032.

257. Poritsky H. The collapse or growth of a spherical bubble or cavity in a viscous liquid. *Proc.. First US Nat. Congr. Appl. Mech.*, 1952, Ann Arbor, Mich, 813–821.

258. Keller J.B., Kolodner I.I. Damping of underwater explosion bubble oscillations. *J. Appl. Phys.*—1956.—27 (10), pp. 1152–1161.
259. Keller J.B., Miksis M.J. Bubble oscillations of large amplitude. *J Acoust Soc Amer.*—1980.—68 (2), pp. 628–633.
260. Prosperetti A., Lezzi A. Bubble dynamics in a compressible liquid. Part 1. First-order theory. *J. Fluids Mech.*—1986.—Vol.168, pp. 457–478.
261. Niedźwiedzka A., Schnerr G. H., Sobieski W. Review of numerical models of cavitating flows with the use of the homogeneous approach. *Archive Thermod.* 2016. 37 (2), pp. 71–88.
262. Анісімов В. В., Єрмаков П.П. Аналіз основних математичних моделей кавітації. *Праці Таврій. держ. агротехнол. ун-ту.*—2015.—15 (3), С. 31–41.
263. Шаталов В.М. Дегазация биожидкостей как механизм биологического действия слабых электромагнитных полей. *Вісн. Харк. нац. ун-ту. Біофіз. вісн.*—2009.—23 (2), С. 120–127.
264. Liu Sh., Kawagoe Y., Makino Y., Oshita S. Effects of nanobubbles on the physicochemical properties of water: The basis for peculiar properties of water containing nanobubbles. *Chem. Eng. Sci.* —2013. —Vol.93, pp. 250–256.
265. HydroGroup. Membrane degassing systems, 2018. <https://www.hydrogroup.biz/fileadmin/redakteur/pdf/product-manual/membrane-degassing-systems-r4i4-en.pdf>
266. Bandara W., Ikeda M., Satoh H., Sasakawa, M., Nakahara Y., Takahashi M., Okabe T.S. Introduction of a degassing membrane technology into anaerobic wastewater treatment. *Water Environ. Res.*—2013.—85(5), 87–90.
267. Bhaumik D., Majumdar S., Fan Q., Sirkar K. Hollow fiber membrane degassing in ultrapure water and micro-biocontamination. *J. Membr. Sci.*—2004.—235(1), pp. 31–41.
268. Osterland S., Weber J. CFD prediction and experimental visualisation of cavitation and its erosion in hydraulic valves. *Flow.*—2025.—Vol. 5, E18. —pp. 1–23.

269. Luo X., Ji B., Tsujimoto Y. A review of cavitation in hydraulic machinery. *J. Hydrodyn.* –2016.–28(3) :335–358.
270. Петренко О.Д., Луговский О.Ф. Огляд методів дегазації робочих рідин. *Mech. Adv. Technol.* –2023.–7 (3), С. 301–308.
271. Rozenberg, L.D. (1973). Liberation of Free Gas from a Liquid. In: Rozenberg, L.D. (eds) *Physical Principles of Ultrasonic Technology*. Ultrasonic Technology, vol 1. Springer, Boston, MA. pp. 422–443.
272. Kapustina O.A. Degassing of liquids. In L.D. Rozenberg (ed.): *Physical Principles of Ultrasonic Technology*, Vol. 1 – Plenum Press, New York, 1973. 377–509.
273. Hsieh D.G. , Plesset M.S. Theory of rectified diffusion of mass into gas bubbles. *J. Acoust. Soc. Amer.* – 1961. – Vol. 33, № 2. – P. 206 - 215.
274. Crum L.A. Measurements of the growth of air bubbles by rectified diffusion. *J. Acoust. Soc. Amer.*–1980.–8 (1), pp. 203–211.
275. Louisnard O., Gomez F. Growth by rectified diffusion of strongly acoustically-forced gas bubbles in nearly saturated liquids. *Phys. Rev. E.*–2003.–67 (3), pp. 1539–3755.
276. Leong, T., Ashokkumar, M., Kentish, S. The Growth of Bubbles in an Acoustic Field by Rectified Diffusion. *Handbook of Ultrason. and Sonochem.*, M. Ashokkumar, (ed.), Springer Science ,Singapore.–2015.–30 p.
277. Sanduleanu S.V., Petrov A.G. Interaction of two nearly contacting gas bubbles pulsating in a liquid in an alternating pressure field. *JETP Lett.*–2020.– Vol.112, pp. 150–156.
278. Fyrrillas M.M., Szeri A.J. Dissolution or growth of soluble spherical oscillating bubbles – the effect of surfactants. *J Fluid Mech.*–1995.– Vol.289, April, pp. 295–314.
279. Zhang X, Li F, Wang C, Mo R, Hu J, Guo J, Lin S. Effects of translational motion on the Bjerknes forces of bubbles activated by strong acoustic waves. *Ultrason.*–2022.–Vol.126, 106808.
280. Казанцев В.Ф. Движение газовых пузырьков под действием сил Бьеркнеса, возникающих в акустическом поле. *Докл. АН СССР*. 1959. –Т.129, №1.– С.64–67.

281. Mettin R., Stephens D., Holly D., Thiele M Some Remarks on Ultrasonic Degassing. //DAGA 2022. Stuttgart, 1390–1393.
282. Ashokkumar M. Handbook of Ultrason. and Sonochemistry. Springer Science, Singapore, 2016, 1487 pages.
283. Liu J., Wang X., Liang J., Qiao Y. Refined secondary Bjerknes force equation for double bubbles with pulsation, translation, and deformation. Ultrason. Sonochem.–2024. –102 (1), 106756.
284. Иваницкий Г.К Численное исследование динамики пузырьков в явлениях акустической кавитации Пром. теплотехника.–2003.–Т.25, №6.–22–28.
285. Subroto T., Eskin D., Beckwith Ch., Tzanakis Ia., Djambazov G. Pericleous R. Improving Ultrasonic Melt Treatment Efficiency Through Flow Management: Acoustic Pressure Measurements and Numerical Simulations. In book: Light Metals 2020, MMSS, Springer, Cham, Switzerland, pp. 981–987.
286. Li J., Tadashi M., Tayu Y., Fu Y. Application of ultrasonic treating to degassing of metal ingots. Mater. Lett.–2008.–62(25), pp. 4152–4154.
287. Amani M., Al-Juhani S., Al-Jubouri M., Yrac R., Taha A. Application of Ultrasonic Waves for Degassing of Drilling Fluids and Crude Oils. Advances in Petroleum Exploration and Development. –2016. –11 (2), pp. 21–30.
288. Karimov A., Bogdanov V., Valliulin R., Sharafutdinov R., Ramazanov A. The Degassing Processes for Oil Media in Acoustic Fields and Their Applications. Polymers.–2022.–14(8), 1497.
289. Deshmukh A.R., Rohit H.R., Gautam A.Ch., Sain M., Anamika Singh A. Hydrodynamic cavitation: unveiling the phenomenon and its fundamentals. In book: Futuristic Trends in “Agriculture Engineering & Food Sciences”.–2024.–Vol.3, Part 4, Chapter 9.–pp. 555–577.
290. Smirnov B.M., Berry R.S. Growth of bubbles in liquid. Chemistry central Jour.–2015. –9 (1), pp.48–57.
291. Bussonnière A., Liu Q., Tsai P.A.. Cavitation Nuclei Regeneration in a Water-Particle Suspension. Physi.Rev. Letters. –2020.– 124 (3), 034501.

292. Caupin F., Arvengas A., Davitt K., Azouzi M.E.M., Shmulovich K.I., Ramboz C., Sessoms D.A., Stroock A.D. Exploring water and other liquids at negative pressure. *J. Phys. Condens. Matter.*—2012.—Vol. 24(48), 7 pages.
293. Blake F.G. The onset of cavitation in liquids. *Acoustics Res. Lab., Harvard Univ., Tech. Memo*, 1949, No. 12, 53 pages.
294. Harkin A., Nadim Ali, Kaper T.J. On acoustic cavitation of slightly subcritical bubbles. *Physics of Fluids.*— 1994.—11 (2), pp.274–287.
295. Safaei S., Mehring C. Effect of dissolved carbon dioxide on cavitation in a circular orifice. *Fluids.*—2024.—24 (2), 41 pages.
296. Lecoffre Y., Marcoz J. Method of degassing a liquid. *U S. Patent*. 4,534,774; Aug.13.1985.
297. Beck E.J. Apparatus for rapidly degassing and decontaminating liquids. //US Patent 5749945; May.12.1998.
298. Montalvao A.F.F., Williams W.R., Pareja H.A.L (Montalvao et al.). Cavitation method and apparatus for deaeration. *US Patent Appl. Publ.* 2003/0111429A1; Jun.19.2003.
299. Saiki K., Hase M., Koyama K., Sakazaki K. (Saiki et fl.) Deaeration device and ultrasonic cleaning device using the same. *US Patent* 7.726,325 B2; Jun. 1.2010.
300. Кондратьев А.Е., Шерешков Ю. И., Чернов Е. А. Способ дегазации жидкости и устройство для его осуществления. *Patent RU2627369C1*, 08.08.2017, Бюл.№22.
301. Kozyuk O. Device and method for degassing liquids. *Patent WO* 2016/153782 A1; September 29, 2016 (29.09.2016).
302. Пилипенко В.В., Жулай Ю.А., Манько И.К. Устройство для дегазации жидкости. *А. с. SU* 1223950, 15.04.86, Бюл.№14.
303. Arias F.J., de las Heras S. Use of hydrodynamic cavitation for volatile removal compound. *Int. J. Heat Fluid Flow.*—2017.—Vol.6, pp. 1–7.

304. Stryczek J., Antoniak P., Banaś M., Stryczek P., Luhovskyi O., Kovaliov V., Kostiuk D., Jahno O. Research into ultrasonic and hydrodynamic cavitation phenomena in a hydraulic system. *Mech. Adv. Technol.*–2021. –5 (1), pp. 33–40.
305. Pashley R.M., Francis M.J., Rzechowicz M. The hydrophobicity of non-aqueous liquids and their dispersion in water under degassed conditions. *Current Opinion in Colloid & Interface Science.*–2008. –13 (4), pp. 236–244.
306. Polášek T., Bureček A., Hružík L., Ledvoň M., Dýrr F., Olšiak R., Kolář D. Experimental study of multiphase flow occurrence caused by cavitation during mineral oil flow. *Physics of Fluids.* –2024. –36 (11), 113377.
307. Zhou J., Vacca A., Manhartgruber B. A novel approach for the prediction of dynamic features of air release and absorption in hydraulic oils. *J. Fluids Eng.*–2013. –135(9), 091305.
308. Lunev A.S., Nikitin A.A., Kaverzina A.S., Novik A.V., Kramarenko V.A. Method for reducing the gas factor in hydraulic fluids. *J. Phys.: Conf. Ser.*–2020. Vol. 1515, 042035.
309. Gall V., Rütten E., Karbstein H. Cavitation patterns in high-pressure homogenization nozzles with cylindrical orifices: influence of mixing stream in simultaneous homogenization and mixing. *Exp. Comput. Multiphase Flow.* 2022. –4 (2), 156–164.
310. Ni W.W., Tucker C.L., Able S.D. The influence of inlet geometry and back pressure on cavitation and noise reduction in high pressure nozzles. *ASME Pressure Vessels and Piping Conference.*–2004. –Vol.46806, pp. 43–49.
311. Schrank K., Murrenhoff H. Modelling of the influence of entrained and dissolved air on the performance of an oil-hydraulic capacity. *Intern. J. Fluid Power.*–2015. –16 (3), pp. 179–187.
312. Schrank K., Murrenhoff H., Stammen C. Investigation of different methods to measure the entrained air content in hydraulic oils. *Proceed. ASME/BATH 2013 Symp. Fluid Power and Motion Control, Bath, UK, 2014, No FPMC2014-7823, V001T01.*

313. Schrank K., Murrenhoff H., Stammen C. Measurements of air absorption and air release characteristics in hydraulic oils at low pressure. *Proceed. ASME/BATH 2013 Symp. Fluid Power and Motion Control*, Sarasota, Florida, USA, 2013, No FPMC2013-4450, V001T01A030; 9 pages.

314 Avellan F. Introduction to cavitation in hydraulic machinery. 6th Internat. Conf. Hydraulic Machinery and Hydrodynamics. Timisoara, Romania: 2004. 14 pages.

315. Wang Y., Li F., Lv M., Wang T., Wang X. A Multi-Index Fusion Adaptive Cavitation Feature Degassing for Hydraulic Turbine Cavitation Detection. *Entropy*, 27 (4):443.

316. Kumar P., Saini R.P. Study of cavitation in hydro turbines. A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. –2010. –14(1), pp. 374–383.

317. Arndt R.E.A. Cavitation in fluid machinery and hydraulic structures. *Annual Review of Fluid Mechanics*. 1981. ARNDT R. E. A. Cavitation in fluid machinery and hydraulic structures. *Ann. Rev. Fluid Mech.* –1981. –Vol. 13, pp. 273–328.

318. Luo X., Wei W. Ji B. Comparison of cavitation prediction for a centrifugal pump with or without volute casing. *J. Mech.Sci. Technol.*–2013.– 27(6), 1643–1648.

319. Gall V., Rütten E., Karbstein H. Cavitation patterns in high-pressure homogenization nozzles with cylindrical orifices: influence of mixing stream in simultaneous homogenization and mixing. *Exp. Comput. Multiphase Flow*.–2021. –4 (2), 156–164.

320. Nöpel J.-A., Zedler Z., Deggelmann M., Braeutigam P., Fröhlich J., Rüdiger F. Experimental investigation of the bubble distribution and chemical reactions induced by hydrodynamic cavitation inside a reactor – a preliminary study. *Proceed. 5-th Intern. Conf. Experim. Fluid Mech.* 2018, Munich, Germany. pp. 679–684.

321. Nöpel J.-A., Fröhlich J., Rüdiger F. Experimental Investigation of cavitation in a jet regarding process optimization. *Proceed. 11-th Intern. Symp. Cavitation (CAV2021)*, 2021, Daejeon, Korea. pp. 1–8.

322. Nöpel J.-A., Krieger M., Frense E., J., Rüdiger F. Characterization of air outgassing process in dye degradation experiments using hydrodynamic jet cavitation. *Proceed. Conf. "Experimental Fluid Mechanics"*.—2022, TU Ilmenau, Part 19, pp. 1–8.

323. Nöpel J.-A., Ayela F., Experimental evidences of radicals production by hydrodynamic cavitation: a short review. *Comptes Rendus. Chimie*. —2023.—Vol. 26, pp. 157–166.

324. Nöpel J.-A., Fröhlich J., Rüdiger F. Impact of outgassing on dye degradation in jet cavitation. *Chem. Eng. Sci.*—2024, Vol. 302, Part B. 120937.

325. Iben U, Morozov A., Winklhofer E., Skoda R. Optical investigations of cavitating flow phenomena in micro channels using a nano second resolution. 3rd International Cavitation Forum 2011 at University of Warwick, UK. pp. 1–7.

326. Iben, U.; Wolf, F.; Freudigmann, H.A.; Fröhlich, J.; Heller, W. Optical measurements of gas bubbles in oil behind a cavitating micro-orifice flow. *Exp. Fluids*.—2015.— 56(6), 114.

327. Iben U., Freudigmann H.-A. Optical analysis of air release in a liquid flow behind an orifice. 14th Workshop on Two-Phase Flow Predictions. Martin Luther Universität Halle Wittenberg, 2015.

328. Freudigmann H.-A., Iben U., Pelz P. F. Air release measurements of V-oil 1404 downstream of a micro orifice at choked flow conditions. *J.Phys.: Conf. Serie.*—2015.—656, 12113, pp. 1–4.

329. Clark A., Dewhurst R.J., Payne P.A., Ellwood C. Degassing a liquid stream using an ultrasonic whistle, (2001) IEEE Ultrason. Symposium. Proceedings. An International Symposium (Cat. No.01CH37263), Atlanta, GA, USA.—2001. —Vol.1, pp. 579–582.

330. Знак З.О., Сухацький Ю. В., Мних Р.В. Розроблення кавітаційно-флотаційного процесу очищення стічних вод в аспекті реалізації сучасних концепцій синтезу хіміко-технологічних систем. *Вісник Нац. університету "Львівська політехніка"*. 2014. — № 787. — С. 75–79.

331. Chen H., Washio S., Takahashi S. Discussions on Accuracy of Modified KDP Method Applied to Simultaneous Measurements of Unsteady Flow Rates, Pressures and Impedances for Pulsating Oil Flows in a Pipe. *Trans. Japan Soc. Mech. Eng., Part B*–2005.–71(712), pp. 2934–2940.

332. Washio S., Takahashi S., Kamiyama K., Banjyoya K., Kikui Sh. On-line deaeration of liquid utilizing a maximum developed stationary cavity in cavitation. *Trans. Japan Soc. Mech. Engineers, Part B*.–2006.–72 (1), pp. 2710–2716.

333. Washio S., Kikui S., Takahashi S. Nucleation and subsequent cavitation in a hydraulic oil poppet valve. *Proceed. Inst. Mech. Eng. Part C*. 2010.–Vol.224, 947–958.

334. Wei M. et al. Performance study and application of new coal-fired boiler flue gas heat recovery system. *Applied energy*. – 2017. – T. 188. – С. 121–129.

335. Про затвердження правил приймання стічних вод до систем централізованого водовідведення та порядку визначення розміру плати, що справляється за понаднормативні скиди стічних вод до систем централізованого водовідведення: наказ Мінрегіону України від 01.12.2017. <https://zakon.rada.gov.ua/go/z0056-18>

336. Burger H., Boehle W. Specification sheet ATV-A 251: Energy-saving high-efficiency boiler systems and condensation water removal; Arbeitsblatt ATV-A 251 schafft Klarheit: Energiesparende Brennwertanlagen und Kondenswasserableitung. *Waermetechnik-Versorgungstechnik*. – 2000. – T. 45. pp. 34–39.

337. Luis Arias. Why condensate neutralization is important and the best way to do it. SFA Saniflo, Canada, 2022. <https://www.sfasaniflo.com/us/blog/why-condensate-neutralization-is-important-and-the-best-way-to-do-it--n427>

338. Целень Б.Я. Спосіб безреагентної нейтралізації кислого конденсату продуктів згоряння природного газу. *Наукові праці ОНАХТ*, випуск 47, Т.2. С. 109–111.

339. 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. Vol. 25. pp. 215–221.

340. Chauvin A. Device for neutralizing acid condensates. Patent US20140193308A1. Sauermann Industrie SA.

341. Viessmann GENO-Neutra V N-70 Installation And Service Instructions Manual page 10. <https://www.manualslib.com/manual/2351822/Viessmann-Geno-Neutra-V-N-70.html>

342. Фіалко Н., Навродська Р., Гнедаш Г., Новаківський М., Сбродова, Г. Використання та відведення кислого водяного конденсату у газоспоживальних котельнях. *Комунальне господарство міст*. – 2021. – 4(164), С. 24–30.

343. Акользин П.А. Коррозия и защита металла теплоэнергетического оборудования. М.: Энергоиздат, 1982. – 304 с.

344. Ефимов А.В., Гончаренко А.Л., Касилов О.В., Гончаренко А.Л. Выбор оптимальных параметров теплоносителей при разработке системы глубокой утилизации теплоты уходящих из котельных агрегатов газов. *Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит* 2014. – № 3. – С. 2–11.

345. Шарапов В.И., Сивухина М.А. Декарбонизаторы: Монография. – Ульяновск: УлГТУ – 2000. – 204 с.

346. Галустов В.С. О декарбонизации воды. *Аква-Терм*. – 2004. – № 5 (21). – С. 76–79.

347. 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.

348. Долінський А.А. Принцип дискретно-імпульсного вводу енергії та його використання в технологічних процесах. *Вісник АН УРСР*. – 1984. – №1. – С.39–46.

349. Долинский А.А., Накорчевский А.И. Принципы оптимизации массо-обменных технологий на основе метода дискретно-импульсного ввода энергии. *Пром. теплотехника*. – 1997. – Т. 19, № 6. – С. 5–9.

350. Долинский А. А., Иваницкий Г.К. Принципы разработки новых энерго-ресурсосберегающих технологий и оборудования на основе методов дискретно-импульсного ввода энергии. Пром. теплотехника. – 1997. – Т. 19. – №. 4–5. – С. 13–25.

351. Долинский А.А., Авраменко А.А., Басок Б.И. Дискретно-импульсный ввод и трансформация энергии – новый подход к воздействию на многофакторные системы. Часть III. Биотехнологические приложения ДИВЭ. Пром. теплотехника.– 2007.– 28 (4), С. 7–17.

352. Долінський А.А., Авраменко А.О., Іваницький Г.К. Фізичні основи, математичні підходи та технологічні аспекти використання методу ДІВЕ для керування кінетикою протікання нанорівневих процесів в дисперсних та супрамолекулярних системах. Пром. теплотехника. – 2014. – Т. 36, № 1. С. 3–17.

353. Долинский А.А., Иваницкий Г.К. Теоретическое обоснование принципа дискретно-импульсного ввода энергии. II. Исследование поведения ансамбля паровых пузырьков. Пром. теплотехника. – 1997. – Т. 18, № 1. – С.3–20.

354. Долинский А.А., Иваницкий Г.К., Басок Б.И. Исследование тепломассообмена и гидродинамики в ансамбле пузырьков при истечении вскипающей жидкости. Труды II Минского международного форума по тепломассообмену (Тепломассообмен ММФ–92). – Т. 4, Ч. 1. – Минск: ИТМО АНБ. – 1992. – С. 127–130.

355. Шурчкова Ю.А. Адиабатное вскипание. Практическое использование. – К.: Наукова думка, 1994. – 278 с.

356. Долинский А.А., Басок Б.И., Накорчевский А.И. Адиабатические вскипающие потоки. Киев: Наукова думка, 2001. – 207 с.

357. Долинский А.А., Шурчкова Ю.А., Иваницкий Г.К., Целень Б.Я. Оптимизация тепломассообменных и гидродинамических процессов в технологии термовакuumной обработки молока. Наука та інновації. – 2010. – 6 (10). С. 59–69.

358. Иваницкий Г.К., Целень Б.Я., Недбайло А.Е. Пути снижения энергетических затрат в технологии термомеханической обработки биологически активных продуктов. Промышленная теплотехника. Том 30, № 6, 2008. – С. 84–88.

359. Каталог інноваційного обладнання та технологій заснованих на принципі дискретно-імпульсного введення енергії / під заг. ред. Ю.Ф. Снежкіна. – Дніпро: ЛІРА, 2025. 46 с. <https://chiffa.org/books/9786178519506/ISBN-978-617-8519-50-6.pdf>

360. Долинский А.А., Ободович А.Н., Борхаленко Ю.А. Метод дискретно-импульсного ввода энергии и его реализация. Харьков: Изд-во Апостроф, 2012. 185 с.

361. Накорчевский А.И., Басок Б.И., Гидродинамика и тепломассообмен в гетерогенных системах и пульсующих потоках.–Киев: Наукова думка, 2001, 345 с.

362. Басок Б.И., Новицька М.П., Чайка О.І. Гидродинамика и теплообмен при пневмо-пульсационном воздействии на жидкие системы.– Київ: Калита, 2014, 140 с.

363. Басок Б.И., Давыденко Б.В., Авраменко А.А., Пироженко И.А. Гидродинамика, теплообмен и эффекты дробления во вращательно-пульсирующих потоках. – Киев, 2012. – 298 с.

364. Долинський А.А., Авдєєва Л.Ю., Макаренко А.А. Кавітаційні технології для виробництва нанопрепаратів. – Київ: Наукова думка, 2020, – 111 с.

365. Долинский А.А., Иваницкий Г.К. Теоретическое обоснование принципа дискретно-импульсного ввода энергии. I. Модель динамики одиночного парового пузырька. Пром. теплотехника. – 1995. – 7 (5), – С.3–28.

366. Долінський А.А., Авраменко А.О., Іваницький Г.К. Використання механізмів і методів ДІВЕ для керування кінетикою перебігу нанорівневих процесів. Вісник НАН України. 2013, №8. – С. 47–57.

367. Грабова Т.Л. Дискретно-імпульсне введення енергії в наноструктуровані гетерогенні системи. Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології. – 2009. – 7 (2), С. 433–441.

368. Авдеева Л.Ю., Иваницкий Г.К. Применение гидродинамической кавитации в технологическом процессе получения фосфолипидных наноструктур. Сб. науч. статей «Современная наука». 2011. № 2 (7). С.52–58.

369. Ivanitsky G.K., Avdeyeva L.Y., Makarenko A.A. Using the effects of hydrodynamic cavitation for purposeful dynamical action on the supramolecular structures. Фізика аеродисперсних систем. – 2017. – №53, С.142–151.

370. Микро- и наноуровневые процессы в технологиях ДИВЭ: Тематич. сб. статей /под общей ред. А.А. Долинского; – К.: Академперіодика, 2015. – 464 с.

371. Ободович О.М., Булій Ю.В., Сидоренко В.В., Степанова О.Є., Целень Б.Я. Вплив комплексної гідродинамічної обробки на дисперсність рослинної сировини в технології отримання паливного етанолу. Енерготехнології та ресурсозбереження. – 2025. – 84(3), 129–137.

372. Obodovych O., Tselen B. Y., Pereiaslavl'tseva, O., Stepanova, O. (2024). Кавітаційні технології та нове тепломасообмінне обладнання – перспективний напрямок приготування водовугільного палива. Теплофізика та теплоенергетика, 46(3), 91–102.

373. Ободович О. М., Целень Б.Я., Степанова О.Є., Недбайло А.Є. Технологія та обладнання для одержання універсального водовугільного палива. Енерготехнології та ресурсозбереження, 2024, 78(1), 24–33.

374. Иваницкий Г.К., Корчинский А.А., Матюшкин М.В. Математическое моделирование процессов в пульсационном диспергаторе ударного типа Пром. теплотехника. – 2003. – 25 (1), С. 29–34.

375. Іваницький Г.К., Гоженко Л.П. Застосування пульсаційного диспергатора для інтенсифікації диспергування фрезерного торфу. Наукові праці ОНАХТ – Одеса, 2013. – Вип. № 43 – Т.1. – С. 120–123.

376. Чайка О.І., Іваницький Г.К., Гоженко Л.П., Корінчук Д.М. Інтенсифікація процесу диспергування низинного торфу із застосуванням пульсаційного диспергатора. Пром. теплотехника, 2013, Т. 35, № 5 – С. 20–26.

377. Obodovych O., Tselen B., Ivanitsky G., Sablii L., Hozhenko L., Nedbailo A., Radchenko N. Increasing the efficiency of wastewater treatment at dairy industry enterprises using cavitation equipment. *Water and Water Purif. Technol. Sci. and Techn. News*, 41(1), 2025, pp. 54–65.

378. Obodovych O.M., Tselen B.Ya., Sydorenko V.V., Ivanytskyi G.K., Radchenko N.L. Application of the method of discrete-pulse energy input for water degassing in municipal and industrial boilers. *Acta Periodica Technologica*. – 2022. – 53, pp. 123–130.

379. Tselen B., Ivanitsky G., Obodovych O., Radchenko N., Nedbailo A., Gozhenko L. Discrete-Pulsed Energy Input Based Method for Neutralisation of the Acidic Condensate. *Rocznik Ochrona Środowiska*. – 2023. – Vol. 25, pp. 215–221.

380. 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.

381. Яроцький С.М., Целень Б.Я. Перспектива використання способу дискретно-імпульсного введення енергії для нейтралізації кислих водних розчинів. *Пром. теплотехника*. 2015. – Том 37, № 4. – С. 23–30.

382. Dolinsky A., Ivanitsky G. Use of discrete-pulse energy input in various production processes. *Proceeding. Intern. Conf. on Transport Phenomena: Science and Technology*. –Beijing (China): Higher Education Press, 1992. – pp. 89–100.

383. Dolinsky A., Ivanitsky G. Collective effects of the behavior of a vapor bubble ensemble in superheated or subcooled liquids. *Proceeding Intern. Conf. on Transport Phenomena: Science and Technology*. – Beijing (China): Higher Education Press, 1996. – pp. 225–233.

384. Basok B., Dolinsky A., Ivanitsky G., Ryzhkova T. Dynamics of single droplets moving through liquid media. *Proceedings of the International Symposium on Liquid-Liquid Two-Phase Flow and Transport Phenomena*. Antalya, Turkey. 5–10 November 1997. Session 3. p. 26–28.

385. Dolinsky A.A., Ivanitsky G.K. Vapor-Gas Bubble Dynamics at Discrete-Pulse Energy Injection. Proceed. Intern. Seminar on Transient Phenomena in Multiphase Flow. Dubrovnik (Jugoslavia). – 1987. Part 4. pp. 86–92.

386. Иваницкий Г.К. Численное моделирование поведения пузырькового кластера в процессах гидродинамической кавитации. Сб. науч. статей “Современная наука”. 2011. № 2 (7). С.52–58.

387. Zhang G., Wu X., Wu Z.Y., Zhang H.T., Kim H.D., Lin Z. 3-D Numerical Study of Cavitation Evolution Through A Butterfly Valve Model at Different Regulating Conditions. J. Appl. Fluid Mech.–2025.–18 (2), pp. 332–347.

388. Shen D., Sou A., Wada Y., Ueki Y. Empirical correlation on circulation and single string cavitation in a diesel nozzle. J. Fluid Sci. Techn. – 2025 Volume 20, Issue 2, Pages JFST0015.

389. Preso D.B., Smirnov I., Salimi M., Kwan J. Broadening the sonochemistry horizon: hurdles and challenges to address in cavitation Curr. Opinion Chem. Eng. –2025. – Vol. 48, 101128.

390. Jahangir S, Hogendoorn W., Poelma Ch.. Dynamics of partial cavitation in an axisymmetric converging-diverging nozzle. Intern. J. Multiphase Flow, 2018. Vol. 106, pp. 34–45.

391. Hauke G., Landaberea A., Garmendia I., Canales J. A segregated method for compressible flow computation. Part I: Isothermal compressible flows. Int. J. Numer. Methods Fluids. 2004. Vol. 190, pp. 271–323.

392. Xu R., Wang Sh., Sagar H.J., Wang H. Bubble Theory and its Applications in Underwater Explosion, Marine Cavitation and Seismic Exploration. J. Marine Sci. Appl.– 2024.–24(2), pp. 255–284.

393. Fuster D. A Review of Models for Bubble Clusters in Cavitating Flows. Flow, Turbulence and Combustion, 102, 2019, pp. 497–536.

394. Fang L., Xu X., Lei M., Li Q., Wang Z. Investigation on post-collapse rebound and rebound-induced pulsations of hydraulic cavitation in a Venturi. Europ. J.Mechanics – B/Fluids.–2025.–Vol.111, May–June, pp, 143–161.

395. A-Man Zhang, Shi-Min Li, Pu Cui, Shuai Li, Yun-Long Liu. A unified theory for bubble dynamics. *Phys. Fluids*, 35, 2023, 033323.
396. Smith W.R., Wang Q.X. Radiative decay of the nonlinear oscillations of an adiabatic spherical bubble at small Mach number. *Journal of Fluid Mechanics*, 837, 2018: 1–18.
397. Fuster D., Dopazo C., Hauke G. Liquid compressibility effects during the collapse of a single cavitating bubble. *J. Acoust. Soc. Am.*–2011.–129 (1).–pp.122–131.
398. Brujan E.-A. Bubble dynamics in a compressible shear-thinning liquid. *Fluid Dynamics Research*.–1998.–23, pp. 291–318.
399. Hilgenfeldt S., Brenner M.P., Grossmann S., Lohse D. Analysis of Rayleigh-Plesset dynamics for sonoluminescing bubbles. *J. Fluid Mech.* 365, 1998, 171–204.
400. Goncalves E. Numerical study of expansion tube problems: towards the simulation of cavitation. *Comput. Fluids* 72, 2013, 1–19.
401. Ivanitsky G.K., Tselen B.Ya., Radchenko N.L., Gozhenko L.P. Modeling of water hammer effect during the single cavitating bubble oscillation. *Physics of Aerodisperse Systems*.–2022.–No 60, pp. 176–186.
402. Alla G.L., Hsiao Ch.-Ts., Choi J.-K. A numerical study of cavitation inception in complex flow fields. *Dynaflow Inc*, 2007, 167 pages.
403. Червяков В.М., Однолько В.Г. Использование гидродинамических и кавитационных явлений в роторных аппаратах: монография М.: Машиностроение, 2008. – 116 с.
404. Knapp R.T., Hollander A. Laboratory Investigation of the Mechanism of Cavitation. *Transaction ASME*.– 1948.–Vol. 70.–P. 419–435.
405. Barber B.P., Hiller R.A., Löfstedt R., Putterman S.J., Weninger K.R. Defining the unknowns of sonoluminescence. *Phys. Rep.*–1997.– 281 (2), pp. 65–143.
406. Moss W. C., Levatin J. L., Szeri A. J. A new damping mechanism in strongly collapsing bubbles. *Proc. R. Soc. London., Series A*.–2002.Vol. 456, pp. 2983–2994.
407. Lastman G., Wentzell R. A. Cavitation of a bubble in an inviscid compressible liquid. *Phys. Fluids*. –1979. – 22, pp. 2259–2266.

408. Lastman G. J., Wentzell R. A. Comparison of five models of spherical bubble response in an inviscid compressible liquid. *J. Acust. Soc. Am.*—1981.—69, 638–642.

409. Rate H. J. Free and forced oscillations of spherical gas bubbles and their translational motion in a compressible fluid. In *Cavitation and Inhomogeneities in Underwater Acoustics* (ed W. Lauterborn). Springer, 1980. 17 pages.

410. Lezzi A., Prosperetti A. Bubble dynamics in a compressible liquid. Part 2. Second-order theory. *J. Fluid Mech.*—1987. Vol. 185, pp. 289–321.

411. Herring C. Theory of the pulsations of the gas bubble produced by an underwater explosion. Columbia Univ., Division of Nat. Defense Research, 1941.

412. Kirkwood J. G., Bethe H. The Pressure Wave Produced by an Underwater Explosion. OSRD Report 5SS.— 1942, 16 pages.

413. Gilmore F.R. The collapse and growth of a spherical bubble in a viscous compressible liquid. Technol. Hydrodyn. Lab., California Institute, 1952.—Rep. No. 26-4.— 40 pages.

414. Hickling R., Plesset M.S. Collapse and rebound of a spherical bubble in water. *Phys. Fluids*. 1964. Vol. 7, pp. 7–14.

415. Tomita Y., Shima A. On the behaviour of a spherical bubble and the impulse pressure in a viscous compressible liquid. *Bull. JSME.*—1997.—20, pp. 1453–1460.

416. Alhelfi A., Sunden D. The cavitation phenomenon: a literature survey. *WIT Trans. Eng. Sc.*—2014.—Vol.83, pp. 351–362.

417. Иваницкий Г. К. Наномасштабные эффекты в процессах кавитации. II. Критерий разрушения кавитационных пузырьков. *Пром. теплотехника.*—2003.—25, №5.—С.5–11.

418. Сабірзянов Т.Г. Математична модель рівноваги в системі «вода – водяна пара». *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*, 2011, випуск 24, ч.1, С. 1–6.

419. Кабачний В.І. Лекції з фізичної хімії : навч. посіб. для студ. вищ. фармац. навч. закл. / В.І. Кабачний, Л.Д. Грицан, Т.О. Томаровська, Л.К. Осіпенко ; за ред. В.І. Кабачного. – Х. : НФаУ : Золоті сторінки, 2012. – 280 с.

420. Поджарський М.А. Теоретичні основи масообмінних процесів: Конспект лекцій. – Д.: РВВ ДНУ, 2006. – 32 с.
421. Gallo M., Occhioni F., Magaletti F., Casciola C.M. Complex transition pathways in boiling and cavitation. *J. Fluid Mech.*–2025.–Vol. 1019, A53, 20 pages.
422. Ермаков Г.В., Липнягов Е.В., Перминов. Изучение характера вскипания жидкости вблизи границы ее достижимого перегрева, ТВТ, 2001, том 39, выпуск 6, 954–961.
423. Бункин Н.Ф., Бункин Ф.В. Бабстонная структура воды и водных растворов электролитов. *УФН.*–2016.– Т. 186, №9.–С.933–952.
424. Емец Б.Г. Определение методом ядерного магнитного резонанса средних размеров и концентрации воздушных пузырьков, содержащихся в воде. *Письма в ЖТФ.*–1997.–Т.23, №13.–С. 42–45.
425. Bird R.B., Stewart W.E., Lightfoot E.N. *Transport phenomena*. N.-Y.: John Wiley & Sons, 2006, 928 p.
426. 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.30–36.
427. Иваницкий Г.К. Моделирование процессов деформирования и дробления капель при движении в жидкости. *Пром.теплотехника.*–1997.–Т.19, №1.–С. 8–16.
428. Taylor G.I. The viscosity of a fluid containing small drops of another fluid. *Proc. Royal Soc.*–1932.–Ser.A138, pp.41–48.
429. Taylor G.I. The formation of emulsions in definable fields of flow. *Proc. Royal Soc.*–1934.–Ser.A 157, pp. 501–523.
430. Torza S., Cox R.G., Mason S.G. Particle motions in sheared suspension. Transient and steady deformation and burst of liquid drops. *J. Colloidal Interface Sci.* 1972. V.38. N2, pp. 395–411.
431. Bentley B.J., Leal L.G. An experimental investigation of drop break-up in two-dimension stationary flow. *J. Fluid Mech.*–1986.–V.167. pp. 241–283.

432. Acrivos A. The breakup of small drops and bubbles in shear flows. *Ann. N. Y. Acad. Sci.*—1983.—404, pp.1–11.
433. Lin Ch., Guo L. Experimental study of drop deformation and breakup in simple shear flows. *Chin. Jour. Chem. Eng.*—2007. —Vol.1, N.5.—P.1–5.
434. Rallison J.M., Acrivos A. A numerical study of the deformation and burst of a viscous drop in an extensional flow. *J. Fluid Mech.*—1978.— 89(1), pp. 191–200.
435. Rallison J.M. A numerical study of the deformation and burst of a viscous drop in general shear flow. *J.Fluid Mech.*—1981.—V.109. pp. 465–482.
436. Komrakova A., Shardt O., Eskin D., Derksen J. Lattice Boltzmann simulations of drop deformation and breakup in shear flow. *Int. J. Multiph. Flow.* 2014. 59, pp. 24–43.
437. Rajagopal K.R. A note on a reappraisal and generalization of the Kelvin–Voigt model. *Mech. Research Commun.*—2009.—36 (2), pp. 232–235.
438. Obodovych O., Tselen B., Pereiaslavitseva O., Stepanova O. Дискретно-імпульсне введення енергії – ефективний метод видалення гідрокарбонату кальцію та зменшення жорсткості води. *Теплофізика та Теплоенергетика*, 2024, 46(3), 33–43.
439. Ободович О.М., Булій Ю.В., Сидоренко В.В., Степанова О.Є., Целень Б.Я. Вплив комплексної гідродинамічної обробки на дисперсність рослинної сировини в технології отримання паливного етанолу. *Енерготехнології та ресурсозбереження.*—2025.—84(3), 129–137.
440. Obodovych O., Bulii Y., Sydorenko V., Stepanova O., Tselen B. Influence of complex hydromechanical treatment on the dispersion of plant raw material in the technology of obtaining fuel ethanol. *Energy Technol Resource Saving.* —2025. —84(2), pp. 129–137.
441. Pispönen A., Pajumägi S., Mootse H., Karus A., Poikalainen V. The lactose from Ricotta cheese whey: The effect of pH and concentration on size and morphology of lactose crystals. *Dairy Sci. Technol.*—2013. Vol.93, pp.477–487.
442. Макаров А.С., Садовский Д.Ю. Влияние технологии стабилизации на реологические свойства и стабильность водоугольных суспензий. *Енерготехнології та ресурсозбереження.* 2017. № 3. С. 13–18.

443. Патент WO/2011/034461, С 10 L 1/32. Способ получения универсального искусственного композиционного жидкого топлива. РСТ/RU2010/000102. 24.03.2011.

444. Способ получения водоугольного топлива. Патент РФ 178456, 2002.

445. Способ получения водоугольного топлива. Патент РФ 192449, 2002.

446. Способ получения водоугольного топлива и технологическая линия для его осуществления. Патент РФ 2249029, С 10 L 1/32. 2005, бюл. № 24.

447. Ободович О. М., Целень Б.Я., Степанова О.Є., Недбайло А.Є., Технологія та обладнання для одержання універсального водовугільного палива. Енерготехнології та ресурсозбереження. – 2024. – 78(1), 24–33.

448. Недбайло А.Є., Іваницький Г.К., Целень Б.Я., Радченко Н.Л., Гоженко Л.П., Щепкін В.І. Застосування пульсаційного диспергатора як гідродинамічного кавітаційного реактора для готування водовугільного палива Теплофізика та теплоенергетика, 2023. –Т.45, №1. – С.28–34.

449. Moya S., Boluda-Botella N. Review of Techniques to Reduce and Prevent Carbonate Scale. Prospecting in Water Treatment by Magnetism and Electromagnetism. Water. –2021. – 13, 2365

450. Kukić D. V., Šćiban M. B., Mitrović B. B., Prodanović J. M., Vasić V. M., Ivetić D. Ž., Antov M. G. Possibility of improvement of boiler water treatment procession exchange vs. reverse osmosis. Desalination and Water Treatment, 51(1–3), 2013, 518–524.

451. Brandão, Y.F.F., dos Santos, L.B., de Araújo, G.P., Pedrosa Júnior, L.P., da Costa Neto, B.F., da Silva, Rd.C.F.S, Benachour, M., Converti, A., Sarubbo, L.A., dos Santos, V.A. Use of High-Frequency Ultrasound Waves for Boiler Water Demineralization/Desalination Treatment. Energies – 2022. – 15(12), 4431.

452 Taqvi S.A., Sohail M., Fahim U. Utilization of Ion-Exchange Technology for Boiler Feed Water Production-Design and Testing. Chemical Engineering. 1, 2016, 26–35.

453. Avdieieva L.I. Implementation of the Principle of Discrete-Pulse Energy Input to the Creation of Nanotechnologies for Food Industry. Sci. Innov.–2016. – 12(4), 11–15.

454. Dolinskyi A. A., Obodovych O. M., Sydorenko V. V. Influence of Discrete Pulse Energy Input at Absorption of Oxygen in the Liquid Medium. *J. Water Chem. Technol.* – 2018. – 40, 354–358.

455. Dolinskiy A. A., Obodovich, A. N., Sydorenko V. V. Intensification of aeration and mass transfer in wastewater treatment by discrete-pulse energy input (DPIE). *Thermophysics and Aeromechanics* –2018. –25(4), 623–630.

456. Tselen B., Ivanitsky G., Nedbaylo A., Radchenko N. 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.

457. Obodovych, O. M., Tselen, B. Ya., Sydorenko, V. V., Ivanytskyi, G. K., Radchenko, N. L. Application of the method of discrete-pulse energy input for water degassing in municipal and industrial boilers. *Acta Periodica Technologica.* – 2022. –53, 123–130.

458. Патент RU 2522602. Способ умягчения воды/ Косинцев В.И., Маланова Н.В., Сечин А.И., Журавков С.П., Яворовский Н.А. 20.07.2014.

459. Патент РФ № 2462422. Способ умягчения воды от солей жесткости. Косинцев В. И., Сечин А. И., Куликова М. В., Бордунов С. В. 27.09.2012. Бюл. № 27.

460. Іваницький Г.К., Чайка О.І., Гоженко Л.П. Застосування кавітаційного реактора пульсаційного типу для екстрагування з рослинної сировини. *Наукові праці ОНАХТ*. 2015. № 47 (2). 138 – 142.

461. Целень Б.Я., Радченко Н.Л, Гоженко Л.П., Іваницький Г.К.. Кавітаційний реактор пульсаційного типу для інтенсифікації процесів екстрагування. Міжнародна науково-практична on-line конференція “Проблеми енергоефективності та автоматизації в промисловості та сільському господарстві” (11–12 листопада 2020 р.). – Кропивницький: ЦНТУ, 2020. С. 201–202.

462. 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, 45(1), 2023, 28–34.

463. Obodovych O., Ivanitsky G., Gozhenko L., Tselen B., Nedbailo A. Аналітичні дослідження ініціювання кавітаційних ефектів у пульсаційному екстракторі з комбінованим гідродинамічним пристроєм. Теплофізика та Теплоенергетика, 47(1), 2025, 41–48.

464. Иваницкий Г.К., Недбайло А.Е., Коник А.В., Целень Б.Я., Гоженко Л.П. Унифицированный подход к моделированию кавитационных реакторов. Зб. наук. праць XVII міжнар. наук. конф. «Удосконалення процесів і обладнання харчових і хімічних виробництв» (вересень 2018). Одеса, ОНАХТ.– С.84–89.

465. Valtz A., Chapoy A., Coquelet Ch., Paricaud P., Richon D. Vapour-liquid equilibria in the carbon dioxide-water system, measurement and modeling from 278.2 to 318.2 K. Fluid Phase Equilibria.–2004.–Vol. 226, pp, 333-344.

466. Mostofin A.A., Sekretar V.E. Calculated pH values of monobasic and polybasic acids. TsKTI Works.–1987. Vol. 231, pp. 989–104.

467. Бункин Н.Ф., Виноградова О.И., Ку克林 А.И., Лобеев Л.В., Мовчан Т.Г. К вопросу о наличии воздушных субмикропузырей в воде: эксперимент по малоугловому рассеянию нейтронов. Письма в ЖЭТФ. 1995. Т. 62. № 8. С. 659–662.

468. Pandey P.K., Jain A., Dixit Sh. Micro and nanobubble water. Intern. J. Eng. Sci. Technol. – 2017. – 4 (12), pp. 4734–4738.

469. Логвинович Г.В., Буйвол В.Н., Дудко С.И. и др. Течения со свободными поверхностями. – Киев: Наукова думка, 1985. – 296 с.

470. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. Ч. I. – М.: Наука, 1987. – 464 с.

ДОДАТОК А

Копія протоколу № Е168/16 дослідження об'єктів довкілля
від 05 грудня 2016 р.

Лабораторія акредитована НАЦІОНАЛЬНИМ АГЕНТСТВОМ З АКРЕДИТАЦІЇ УКРАЇНИ за ДСТУ ISO/IEC 17025-2006 Атестат від 28 вересня 2012р № 2Н678.	ПІДПРИЄМСТВО "ЕКОМЕДСЕРВІС" екологічна лабораторія 04071, м.Київ-71, вул. Хорива, 31 А тел. 468-35-15 т/ф.425-40-55	Державне підприємство Всеукраїнський державний науково- виробничий центр стандартизації, метрології, сертифікації та захисту прав споживачів Свідоцтво про атестацію №ПТ-193/14 від 10.06.2014.

ПРОТОКОЛ № Е 168/16
дослідження об'єктів довкілля
від 05 грудня 2016 р.

Заявник: Інститут технічної теплофізики, НАН України.

Об'єкт(и) випробувань: Вода

Е 168/16-1. Зразок №1. Необроблена вода (конденсат)

Е 168/16-2. Зразок №2. Конденсат, оброблений протягом 5 хвилин.

Е 168/16-3. Зразок №3. Конденсат, оброблений протягом 10 хвилин

Е 168/16-3. Зразок №4. Конденсат, оброблений протягом 15 хвилин

Дата відбору: 01.12.16.

Дата доставки зразків в лабораторію: 01.12.16.

Дата(и) проведення випробувань: 01.12.16 - 05.12.16.

Мета досліджень: визначення показників якості конденсату вод.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Таблиця

Найменування Показника	Вимоги НД	Результат вимірювань	Позначення НД на метод випробувань	Відмітка про відповідність
1	2	3	4	5

Е 168/16-1. Зразок №1. Необроблена вода (конденсат).

Фізико – хімічні показники.

1	2	3	4	5	6
Водневий показник, рН	За фактичним значенням	4,12	±0.2од	ДСТУ 4087-2001	---
Жорсткість, мг-екв/дм ³	За фактичним значенням	0,2	±15%	ГОСТ 4151-72	-----
Кальцій, мг/дм ³	За фактичним значенням	1,2	---	«Унифицированные методы анализа вод под ред. Лурье»	----
Магній, мг/дм ³	За фактичним значенням	1,7	---	«Унифицированные методы анализа вод под ред. Лурье»	----
Лужність, мг-екв/дм ³	За фактичним значенням	0,19	---	Унифицированные методы анализа вод под ред. Лурье	---
Аміак, мг/дм ³	За фактичним значенням	Менше 0,05	±10%	ГОСТ 4192-82	-----
Нітрити, мг/дм ³	За фактичним значенням	Менше 0,003	±25%	ГОСТ 4192-82	---
Нітрати, мг/дм ³	За фактичним значенням	Менше 0,44	±15%	ГОСТ 18826-73	---
Фосфати, мг/дм ³	За фактичним значенням	Менше 0,01	±30%	МВВ 081/0005-01	---
Сульфати (SO ₄), мг/дм ³	За фактичним значенням	2,64	±10%	ГОСТ 4389-72	-----
Хлориди, мг/дм ³	За фактичним значенням	4,25	---	ГОСТ 4245-72	---

Підприємство
"ЕКОМЕДСЕРВІС"
м. Київ, вул. Хорива, 31-А

1	2	3	4	5	6
Залізо, мг/дм ³	За фактичним значенням	0,048	+30%	МВВ 081/12-4628-00	---
Перманганатне окислення, мг/дм ³	За фактичним значенням	2,8	+30%	Унифицированные методы анализа вод под ред. Лурье	----
Гідрокарбонати, мг/дм ³	За фактичним значенням	11,6	---	МВВ 081/12-0006-01	---
Мутність, НОК	За фактичним значенням	Менше 1	+20%	ГОСТ 3351-74	---
Натрій і калій, мг/дм ³	За фактичним значенням	4,19	---	розрахунковий	---
Сухий залишок, мг/дм ³	За фактичним значенням	Менше 5	---	ГОСТ 18164-72	---

Е 168/16-2. Зразок №2. Конденсат, оброблений протягом 5 хвилин.
Фізико – хімічні показники:

1	2	3	4	5	6
Водневий показник, рН	За фактичним значенням	5,07	+0.2од	ДСТУ 4087-2001	---
Жорсткість, мг-екв/дм ³	За фактичним значенням	0,15	+15%	ГОСТ 4151-72	----
Кальцій, мг/дм ³	За фактичним значенням	2,0	---	«Унифицированные методы анализа вод под ред. Лурье»	----
Магній, мг/дм ³	За фактичним значенням	0,61	---	«Унифицированные методы анализа вод под ред. Лурье»	----
Лужність, мг-екв/дм ³	За фактичним значенням	0,24	---	Унифицированные методы анализа вод под ред. Лурье	---
Аміак, мг/дм ³	За фактичним значенням	0,16	+10%	ГОСТ 4192-82	----
Нітрити, мг/дм ³	За фактичним значенням	0,003	+25%	ГОСТ 4192-82	---
Нітрати, мг/дм ³	За фактичним значенням	Менше 0,44	+15%	ГОСТ 18826-73	---
Фосфати, мг/дм ³	За фактичним значенням	0,012	+30%	МВВ 081/0005-01	---
Сульфати (SO ₄), мг/дм ³	За фактичним значенням	2,64	+10%	ГОСТ 4389-72	----
Хлориди, мг/дм ³	За фактичним значенням	4,25	---	ГОСТ 4245-72	---
Залізо, мг/дм ³	За фактичним значенням	0,27	+30%	МВВ 081/12-4628-00	---
Перманганатне окислення, мг/дм ³	За фактичним значенням	1,76	+30%	Унифицированные методы анализа вод под ред. Лурье	----
Гідрокарбонати, мг/дм ³	За фактичним значенням	14,6	---	МВВ 081/12-0006-01	---
Мутність, НОК	За фактичним значенням	Менше 1	+20%	ГОСТ 3351-74	---
Натрій і калій, мг/дм ³	За фактичним значенням	6,62	---	розрахунковий	---
Сухий залишок, мг/дм ³	За фактичним значенням	Менше 5	---	ГОСТ 18164-72	---

м. Київ, вул. Хорина, 31-А

Е 168/16-3. Зразок №3. Конденсат, оброблений протягом 10 хвилин.

Фізико-хімічні показники:

1	2	3	4	5	6
Водневий показник, рН	За фактичним значенням	5,29	± 0.20	ДСТУ 4087-2001	---
Жорсткість, мг-екв/дм ³	За фактичним значенням	0,4	$\pm 15\%$	ГОСТ 4151-72	---
Кальцій, мг/дм ³	За фактичним значенням	4,0	---	«Унифицированные методы анализа вод под ред. Лурье»	---
Магній, мг/дм ³	За фактичним значенням	2,43	---	«Унифицированные методы анализа вод под ред. Лурье»	---
Лужність, мг-екв/дм ³	За фактичним значенням	0,24	---	Унифицированные методы анализа вод под ред. Лурье	---
Аміак, мг/дм ³	За фактичним значенням	0,23	$\pm 10\%$	ГОСТ 4192-82	---
Нітриди, мг/дм ³	За фактичним значенням	0,003	$\pm 25\%$	ГОСТ 4192-82	---
Нітрати, мг/дм ³	За фактичним значенням	Менше 0,44	$\pm 15\%$	ГОСТ 18826-73	---
Фосфати, мг/дм ³	За фактичним значенням	Менше 0,01	$\pm 30\%$	МВВ 081/0005-01	---
Сульфати (SO ₄), мг/дм ³	За фактичним значенням	2,64	$\pm 10\%$	ГОСТ 4389-72	---
Хлориди, мг/дм ³	За фактичним значенням	4,96	---	ГОСТ 4245-72	---
Залізо, мг/дм ³	За фактичним значенням	0,23	$\pm 30\%$	МВВ 081/12-4628-00	---
Перманганатне окислення, мг/дм ³	За фактичним значенням	2,72	$\pm 30\%$	Унифицированные методы анализа вод под ред. Лурье	---
Гідрокарбонати, мг/дм ³	За фактичним значенням	14,6	---	МВВ 081/12-0006-01	---
Мутність, НОК	За фактичним значенням	Менше 1	$\pm 20\%$	ГОСТ 3351-74	---
Натрій і калій, мг/дм ³	За фактичним значенням	0,87	---	розрахунковий	---
Сухий залишок, мг/дм ³	За фактичним значенням	Менше 5	---	ГОСТ 18164-72	---

Підприємство
"ЕКОМЕДСЕРВІС"
м. Київ, вул. Хорька, 31-А

Е 168/16-3. Зразок №4. Конденсат, оброблений протягом 15 хвилин
Фізико – хімічні показники

1	2	3	4	5	6
Водневий показник, рН	За фактичним значенням	6,02	± 0.2 од	ДСТУ 4087-2001	---
Жорсткість, мг-екв/дм ³	За фактичним значенням	0,3	$\pm 15\%$	ГОСТ 4151-72	-----
Кальцій, мг/дм ³	За фактичним значенням	2,4	---	«Унифицированные методы анализа вод под ред. Лурье»	----
Магній, мг/дм ³	За фактичним значенням	2,19	---	«Унифицированные методы анализа вод под ред. Лурье»	----
Лужність, мг-екв/дм ³	За фактичним значенням	0,22	---	Унифицированные методы анализа вод под ред. Лурье	---
Аміак, мг/дм ³	За фактичним значенням	0,21	$\pm 10\%$	ГОСТ 4192-82	-----
Нітрити, мг/дм ³	За фактичним значенням	0,008	$\pm 25\%$	ГОСТ 4192-82	---
Нітрати, мг/дм ³	За фактичним значенням	Менше 0,44	$\pm 15\%$	ГОСТ 18826-73	---
Фосфати, мг/дм ³	За фактичним значенням	0,7	$\pm 30\%$	МВВ 081/0005-01	---
Сульфати (SO ₄), мг/дм ³	За фактичним значенням	3,1	$\pm 10\%$	ГОСТ 4389-72	-----
Хлориди, мг/дм ³	За фактичним значенням	4,96	---	ГОСТ 4245-72	---
Залізо, мг/дм ³	За фактичним значенням	0,23	$\pm 30\%$	МВВ 081/12-4628-00	---
Перманганатне окислення, мг/дм ³	За фактичним значенням	3,2	$\pm 30\%$	Унифицированные методы анализа вод под ред. Лурье	-----
Гідрокарбонати, мг/дм ³	За фактичним значенням	13,4	---	МВВ 081/12-0006-01	---
Мутність, НОК	За фактичним значенням	Менше 1	$\pm 20\%$	ГОСТ 3351-74	---
Натрій і калій, мг/дм ³	За фактичним значенням	3,11	---	розрахунковий	---
Сухий залишок, мг/дм ³	За фактичним значенням	Менше 5	---	ГОСТ 18164-72	---

Завідуючий екологічної лабораторії
підприємства "ЕКОМЕДСЕРВІС"



Т.О.Щиголь

ДОДАТОК Б

Копія протоколу № Е169/16 дослідження об'єктів довкілля
від 16 грудня 2016 р.

Лабораторія акредитована НАЦІОНАЛЬНИМ АГЕНТСТВОМ З АКРЕДИТАЦІЇ УКРАЇНИ за ДСТУ ISO/IEC 17025:2006 Атестат від 28 вересня 2012р № 2Н678.	ПІДПРИЄМСТВО "ЕКОМЕДСЕРВІС" екологічна лабораторія 04071, м.Київ-71, вул. Хорива, 31 А тел. 468-35-15 т/ф.425-40-55	Державне підприємство Всеукраїнський державний науково- виробничий центр стандартизації, метрології, сертифікації та захисту прав споживачів Свідцтво про атестацію №ПТ-193/14 від 10.06.2014.

ПРОТОКОЛ № Е 169/16
дослідження об'єктів доквілля
від 16 грудня 2016 р.

Заявник: Інститут технічної теплофізики, НАН України.

Об'єкт(и) випробувань: Конденсат продуктів згорання природного газу.

Е 168/16-1. Вихідний зразок.

Е 168/16-2. Вода (конденсат) оброблений протягом 5 хвилин

Е 168/16-3. Вода (конденсат) оброблений протягом 10 хвилин

Дата відбору: 14.12.16.

Дата доставки зразків в лабораторію: 14.12.16.

Дата(и) проведення випробувань: 14.12.16 - 16.12.16.

Мета досліджень: визначення показників якості конденсату продуктів згорання природного газу.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Таблиця

Найменування Показника	Вимоги НД	Результат вимірювань	Позначення НД на метод випробувань	Відмітка про відповідність
1	2	3	4	5

Е 168/16-1. Вихідний зразок.

Фізико – хімічні показники:

1	2	3	4	5	6
Водневий показник, рН	За фактичним значенням	4,08	+0,2од	ДСТУ 4087-2001	----
Жорсткість, мг-екв/дм ³	За фактичним значенням	0,1	±15%	ГОСТ 4151-72	----
Кальцій, мг/дм ³	За фактичним значенням	1,6	---	«Унифицированные методы анализа вод под ред. Лурье»	----
Магній, мг/дм ³	За фактичним значенням	0,24	---	«Унифицированные методы анализа вод под ред. Лурье»	----
Лужність, мг-екв/дм ³	За фактичним значенням	0,12	---	Унифицированные методы анализа вод под ред. Лурье	----
Аміак, мг/дм ³	За фактичним значенням	1,42	±10%	ГОСТ 4192-82	----
Нітрити, мг/дм ³	За фактичним значенням	Менше 0,003	±25%	ГОСТ 4192-82	---
Нітрати, мг/дм ³	За фактичним значенням	4,68	±15%	ГОСТ 18826-73	---
Фосфати, мг/дм ³	За фактичним значенням	Менше 0,01	±30%	МВВ 081/0005-01	---
Сульфати (SO ₄), мг/дм ³	За фактичним значенням	8,94	±10%	ГОСТ 4389-72	----
Хлориди, мг/дм ³	За фактичним значенням	3,69	---	ГОСТ 4245-72	---

Підприємство
"ЕКОМЕДСЕРВІС"
м. Київ, вул. Хорива, 31-А

1	2	3	4	5	6
Залізо, мг/дм ³	За фактичним значенням	Менше 0,1	+30%	МВВ 081/12-4628-00	---
Перманганатне окислення, мг/дм ³	За фактичним значенням	2,0	+30%	Унифицированные методы анализа вод под ред. Лурье	----
Гідрокарбонати, мг/дм ³	За фактичним значенням	7,32	---	МВВ 081/12-0006-01	---
Мутність, НОК	За фактичним значенням	Менше 1	+20%	ГОСТ 3351-74	---
Натрій і калій, мг/дм ³	За фактичним значенням	7,75	---	розрахунковий	---
Сухий залишок, мг/дм ³	За фактичним значенням	Менше 5	---	ГОСТ 18164-72	---

Е 168/16-2. Вода (конденсат) оброблений протягом 5 хвилин.

Фізико — хімічні показники:

1	2	3	4	5	6
Водневий показник, рН	За фактичним значенням	6,16	±0.2од	ДСТУ 4087-2001	---
Жорсткість, мг-екв/дм ³	За фактичним значенням	0,13	±15%	ГОСТ 4151-72	----
Кальцій, мг/дм ³	За фактичним значенням	2,4	---	«Унифицированные методы анализа вод под ред. Лурье»	----
Магній, мг/дм ³	За фактичним значенням	0,12	---	«Унифицированные методы анализа вод под ред. Лурье»	----
Лужність, мг-екв/дм ³	За фактичним значенням	0,16	---	Унифицированные методы анализа вод под ред. Лурье	---
Аміак, мг/дм ³	За фактичним значенням	1,64	+10%	ГОСТ 4192-82	----
Нітрити, мг/дм ³	За фактичним значенням	0,014	+25%	ГОСТ 4192-82	---
Нітрати, мг/дм ³	За фактичним значенням	4,87	±15%	ГОСТ 18826-73	---
Фосфати, мг/дм ³	За фактичним значенням	Менше 0,01	+30%	МВВ 081/0005-01	---
Сульфати (SO ₄), мг/дм ³	За фактичним значенням	12,8	+10%	ГОСТ 4389-72	----
Хлориди, мг/дм ³	За фактичним значенням	3,4	---	ГОСТ 4245-72	---
Залізо, мг/дм ³	За фактичним значенням	0,011	+30%	МВВ 081/12-4628-00	---
Перманганатне окислення, мг/дм ³	За фактичним значенням	2,72	+30%	Унифицированные методы анализа вод под ред. Лурье	----
Гідрокарбонати, мг/дм ³	За фактичним значенням	9,76	---	МВВ 081/12-0006-01	---
Мутність, НОК	За фактичним значенням	Менше 1	+20%	ГОСТ 3351-74	---
Натрій і калій, мг/дм ³	За фактичним значенням	9,8	---	розрахунковий	---
Сухий залишок, мг/дм ³	За фактичним значенням	Менше 5	---	ГОСТ 18164-72	---

Підприємство
"ЕКОЧЕДСЕРВІС"
м. Київ, вул. Хорган, 31-А

Е 168/16-3. Вода (конденсат) оброблений протягом 10 хвилин
Фізико – хімічні показники:

1	2	3	4	5	6
Водневий показник, рН	За фактичним значенням	6,2	± 0.2 од	ДСТУ 4087-2001	---
Жорсткість, мг-екв/дм ³	За фактичним значенням	0,15	$\pm 15\%$	ГОСТ 4151-72	-----
Кальцій, мг/дм ³	За фактичним значенням	2,4	---	«Унифицированные методы анализа вод под ред. Лурье»	----
Магній, мг/дм ³	За фактичним значенням	0,36	---	«Унифицированные методы анализа вод под ред. Лурье»	----
Лужність, мг-екв/дм ³	За фактичним значенням	0,14	---	Унифицированные методы анализа вод под ред. Лурье	---
Аміак, мг/дм ³	За фактичним значенням	1,57	$+10\%$	ГОСТ 4192-82	-----
Ніприти, мг/дм ³	За фактичним значенням	0,005	$\pm 25\%$	ГОСТ 4192-82	---
Нітрати, мг/дм ³	За фактичним значенням	4,87	$\pm 15\%$	ГОСТ 18826-73	---
Фосфати, мг/дм ³	За фактичним значенням	Менше 0,01	$\pm 30\%$	МВВ 081/0005-01	---
Сульфати (SO ₄), мг/дм ³	За фактичним значенням	11,4	$\pm 10\%$	ГОСТ 4389-72	-----
Хлориди, мг/дм ³	За фактичним значенням	3,69	---	ГОСТ 4245-72	---
Залізо, мг/дм ³	За фактичним значенням	0,067	$\pm 30\%$	МВВ 081/12-4628-00	---
Перманганатне окислення, мг/дм ³	За фактичним значенням	3,36	$\pm 30\%$	Унифицированные методы анализа вод под ред. Лурье	-----
Гідрокарбонати, мг/дм ³	За фактичним значенням	8,54	---	МВВ 081/12-0006-01	---
Мутність, НОК	За фактичним значенням	Менше 1	$\pm 20\%$	ГОСТ 3351-74	---
Натрій і калій, мг/дм ³	За фактичним значенням	8,28	---	розрахунковий	---
Сухий залишок, мг/дм ³	За фактичним значенням	Менше 5	---	ГОСТ 18164-72	---

Завідуючий екологічної лабораторії
підприємства "ЕКОМЕДСЕРВІС" .



Т.О.Щиголь

ДОДАТОК В

Копія Технічного завдання на виконання науково-технічної
роботи згідно договору № ДЗ/52-2015 від 30.10.2015 р.
(номер державної реєстрації 0115U005525)

Додаток 1
до договору № ДЗ/ 52 - 2015
від 30 10 2015 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Заступник Міністра освіти і науки



ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ
на виконання науково-технічної роботи

Розроблення двокамерної установки для безреагентної нейтралізації кислих конденсатів
продуктів згоряння газу в опалювальних та промислових котельнях

ВИКОНАВЕЦЬ:



Директор Інституту технічної
теплофізики НАН України
А.А. Долінський

Науковий керівник

(підпис) А.А. Долінський

ВІД ЗАМОВНИКА:

Директор департаменту
науково-технічного розвитку

(підпис) Д.В.Чеберкус

Начальник відділу досліджень і розробок

(підпис) С.І. Клесова

Головний спеціаліст відділу досліджень і
розробок

(підпис) Л.С. Спиця

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ **на виконання науково-технічної роботи**

Лот № 2: Розроблення двокамерної установки для безреагентної нейтралізації кислих конденсатів продуктів згоряння газу в опалювальних і промислових котельнях.

1. Мета виконання роботи:

Метою проекту є розроблення і проведення приймальних випробувань дослідного зразка двокамерної установки для безреагентної нейтралізації кислих конденсатів продуктів згоряння газу в опалювальних і промислових котельнях, що характеризується підвищеною продуктивністю і ефективністю нейтралізації, а також оптимально вибраними режимними параметрами.

2. Основні завдання:

1. Розроблення робочої конструкторської документації на дослідний зразок двокамерної установки для безреагентної нейтралізації кислих конденсатів продуктів згоряння газу в опалювальних і промислових котельнях, яка містить:
 - 1.1. Комплект робочих креслень;
 - 1.2. Програму та методику випробувань;
 - 1.3. Технічні умови на виготовлення установки;
 - 1.4. Паспорт на дослідний зразок установки.
2. Виготовлення дослідного зразка двокамерної установки для безреагентної нейтралізації кислих конденсатів продуктів згоряння газу в опалювальних і промислових котельнях.
3. Проведення приймальних випробувань дослідного зразка установки.

3. Загальні вимоги до виконання роботи:

Дослідний зразок двокамерної установки для безреагентної нейтралізації кислих конденсатів продуктів згоряння газу в опалювальних і промислових котельнях повинен відповідати наступним вимогам:

- продуктивність по нейтралізованому конденсату – до 1200 кг/год;
- споживання електроенергії – не більше 3,75 кВт;
- габаритні розміри, мм – не більше 650x800x1100;
- величина водневого показника нейтралізованого конденсату – не нижче 6,0.

Строк виконання роботи – з дати укладання договору до 20 грудня 2016 року.

4. Результати виконання роботи:

1. Робоча конструкторська документація на дослідний зразок двокамерної установки для безреагентної нейтралізації кислих конденсатів продуктів згоряння газу в опалювальних і промислових котельнях, яка містить:
 - 1.1. Комплект робочих креслень
 - 1.2. Програму та методику випробувань;
 - 1.3. Технічні умови на виготовлення установки
 - 1.4. Паспорт на дослідний зразок установки.
2. Дослідний зразок двокамерної установки для безреагентної нейтралізації кислих конденсатів продуктів згоряння газу в опалювальних і промислових котельнях.
3. Акт і протокол проведення приймальних випробувань дослідного зразка установки;
4. Анований звіт про виконану роботу по завершенні кожного етапу.

ДОДАТОК Г

Копія акту про проведення приймальних випробувань дослідного зразка установки
нейтралізатора безреагентного

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор
Інституту технічної теплофізики
НАН України



Ю.Ф. Снежкін

16 грудня 2016 р.

АКТ
про проведення приймальних випробувань Дослідного зразка установки нейтралізатора
безреагентного
(номер державної реєстрації НТР 0115U005525)

Комісія у складі:

голови Долінського А.А., почесного директора ІТТФ НАН України
і членів комісії: 1. Гартвіга А.П., старшого наукового співробітника ІТТФ НАН України;
2. Целеня Б.Я., старшого наукового співробітника ІТТФ НАН України;
3. Коник А.В., провідного наукового співробітника ІТТФ НАН України;
4. Шуляка В.В., головного механіка ІТТФ НАН України;
5. Макаренко Л.А., комерційного директора ТОВ «ДЕМО ЛДТ»;
6. Колесніченка М.В., інженера ТОВ «ДЕМО ЛДТ»,

що працювала на підставі наказу по Інституту технічної теплофізики НАН України № 40-Н від 14.10.2016 р., у період з 12 грудня 2016 р. до 16 грудня 2016 р. провела приймальні випробування Дослідного зразка установки нейтралізатора безреагентного.

Випробування проведені в Інституті технічної теплофізики НАН України за програмами і методиками, які розроблені в Інституті технічної теплофізики НАН України і затверджені Ю.Ф. Снежкіним, директором Інституту технічної теплофізики НАН України.

1. Мета випробувань – визначення працездатності Дослідного зразка установки нейтралізатора безреагентного і можливості його впровадження в систему глибокої утилізації теплоти димових газів від газових котлів для нейтралізації кислого конденсату продуктів згоряння димових газів, визначити відповідність дослідного зразка нейтралізатора безреагентного технічному завданню НБ 00.00.000 ТЗ, конструкторській документації НБ 00.00.000, вимогам стандартів, визначити можливість передачі нейтралізатора безреагентного Замовнику.

2. Результати випробувань наведені в Протоколі про проведення приймальних випробувань Дослідного зразка установки нейтралізатора безреагентного від 16 грудня 2016 р.

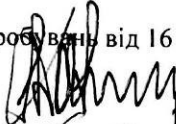
3. За результатами проведених приймальних випробувань комісія вважає проведені випробування успішними.

4. Висновки комісії: Дослідний зразок установки нейтралізатора безреагентного відповідає технічному завданню НБ 00.00.000 ТЗ, конструкторській документації НБ 00.00.000 і вимогам стандартів, пропонується передати Дослідний зразок установки на промислове підприємство або підприємство комунальної енергетики з метою його впровадження в систему глибокої утилізації теплоти димових газів від газових котлів для нейтралізації кислого конденсату продуктів згоряння димових газів.

5. Додатки: Протокол проведення приймальних випробувань від 16 грудня 2016 р.

Голова комісії

Члени комісії



Долінський А.А.



Гартвіг А.П.



Целень Б.Я.

Four handwritten signatures are stacked vertically. The first signature is 'А.В. Коник', the second is 'В.В. Шуляк', the third is 'Л.А. Макаренко', and the fourth is 'М.В. Колесніченко'.

Коник А.В.

Шуляк В.В.

Макаренко Л.А

Колесніченко М.В.

ДОДАТОК Д

Акти впровадження результатів досліджень

ЗАТВЕРДЖУЮ

Декан інженерно-хімічного
факультету КПІ ім. Ігоря Сікорського,
професор



Є.М. Панов

«23» листопада 2017 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор інституту технічної
теплофізики НАН України,
член-кор. НАН України



Ю.Ф. Снежкін

«23» листопада 2017 р.

АКТ

Впровадження результатів досліджень, отриманих при виконанні роботи
«Розроблення двокамерної установки для безреагентної нейтралізації
кислих конденсатів продуктів згоряння газу в опалювальних та промислових
котельнях»

Адреса об'єкту: 03056, м. Київ, проспект Перемоги, 37, корпус 19

Згідно договорів про співпрацю 3/17 СП від 15.11.2017 р. та 15 СП від 15.06.2015 р. представниками відділу тепломасообміну в дисперсних системах інституту технічної теплофізики НАН України – лабораторією теплофізичних основ дискретно-імпульсного введення енергії на кафедрі машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв інженерно-хімічного факультету КПІ ім. Ігоря Сікорського проведено дослідження зміни водневого показника води, отриманої на виході зі скрубера лабораторної установки виробництва гранульованих мінеральних добрив, що містила розчинений сульфат амонію і гумати.

Проведено вимірювання рН до і після обробки на дослідному зразку установки нейтралізатора безреагентного. Встановлено, що рН обробленої води знаходиться в межах 6,5 – 7,0.

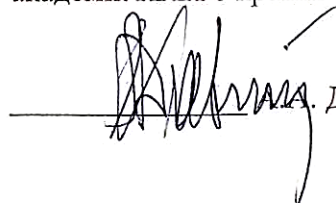
Отримані результати дозволяють рекомендувати нейтралізатор безреагентний для оснащення технологічної схеми виробництва гранульованих мінеральних добрив, що дозволить знизити навантаження на

навколишнє середовище. Теоретичні результати, отримані при виконанні науково-технічної роботи використано при викладанні навчальної дисципліни «Моделювання процесів та обладнання підготовки середовищ та отримання біотехнологічних матеріалів».

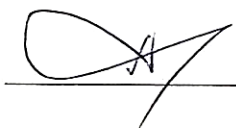
Зав. кафедри МАХНВ ІХФ,
д.т.н., професор

 Я.М. Корнієнко

Зав. відділу ТДС ІТТФ НАН України,
академік НАН України

 А. Долінський

Доцент кафедри МАХНВ ІХФ,
к.т.н., доцент

 А.Р. Степанюк

Старший науковий співробітник
відділу ТДС ІТТФ НАН України,
к.т.н.

 Б.Я. Целень

ЗАТВЕРДЖУЮ
 Декан інженерно-хімічного
 факультету КНУ ім. Ігоря Сікорського,
 професор
 С.М. Панов
 11 листопада 2021 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ
 Директор інституту технічної
 теплофізики НАН України,
 академік НАН України
 Ю.Ф. Сисєвкін
 11 листопада 2021 р.

АКТ

Впровадження результатів досліджень, отриманих при виконанні роботи за
 відомчою тематикою 1.7.1.881

«Дослідження процесів трансформації енергії в рідких гетерогенних системах
 при використанні методу дискретно- імпульсного введення енергії»

Адреса об'єкту: 03056, м. Київ, проспект Перемоги, 37, корпус 19

Згідно договорів про співпрацю 04 ПР від 05.04.2021 р. співробітниками
 відділу тепломасообміну в дисперсних системах Інституту технічної
 теплофізики НАН України – лабораторією теплофізичних основ дискретно-
 імпульсного введення енергії розроблено фізичну та математичну моделі, що
 описують кінетику кавітаційних процесів у соплі Вентурі, яке розглядається як
 ефективний кавітаційний реактор, що застосовується сьогодні у багатьох
 промислових технологіях. Дана модель може розглядатись як важливий і
 корисний інструмент при вдосконаленні існуючих та створенні інноваційних
 технологій в різних галузях виробництва.

Отримана модель використовується при викладанні навчальних
 дисциплін «Процеси перенесення у суцільних середовищах» та «Інноваційні
 технології глибокої переробки органічних матеріалів».

Зав. кафедри МАХНВ ІХФ,
 к.т.н., доцент
 А.Р. Степанюк

Зав. відділу ТДС ІТТФ НАН України,
 д.т.н., гол. наук. співробітник
 О.М. Ободович

Професор кафедри МАХНВ ІХФ,
 д.т.н., с.н.с.
 Г.К. Іваницький

Зав. лабораторії теплофізичних основ
 ДІВЕ, пр. наук. співробітник відділу
 ТДС ІТТФ НАН України, к.т.н.
 Б.Я. Целень

ЗАТВЕРДЖУЮ
Декан інженерно-хімічного факультету
КПІ ім. Ігоря Сікорського,
професор



С.М. Панов

2024 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ
Директор інституту технічної
теплофізики НАН України,
академік НАН України



Ю.Ф. Снежкін

2024 р.

АКТ

Впровадження результатів досліджень, отриманих при виконанні роботи за відомчою тематикою І.7.1.895

«Синергетичний ефект імпульсного впливу в гідродинамічних і тепломасообмінних процесах для створення енергосективних технологій» (№ держ. реєстр. 0120U103391)

Згідно договору про співпрацю 04 ПР від 05.04.2021 р. співробітниками відділу тепломасообміну в дисперсних системах Інституту технічної теплофізики НАН України – лабораторією теплофізичних основ дискретно-імпульсного введення енергії розроблено математичну модель для адекватного опису процесів кавітації у в'язких стисливих рідинах. На базі розробленої моделі проведено чисельне моделювання процесів кавітації в трубі пульсаційного диспергатора в широкому діапазоні зміни конструктивних та режимних параметрів з використанням критеріїв ефективності методу дискретно-імпульсного введення енергії.

Розроблена математична модель дозволяє оптимізувати процеси кавітаційного екстрагування з рослинної сировини залежно від її морфологічної структури, визначати раціональні геометричні параметри обладнання та оптимальні режими його роботи стосовно конкретних задач до екстрагування цільових компонентів з рослинної сировини і може розглядатись як важливий і корисний інструмент при вдосконаленні існуючих та створенні інноваційних технологій в різних галузях виробництва.

Отримані результати впроваджені в навчальні дисципліни:

Здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти за освітньою програмою «Комп'ютерно-інтегровані технології проектування обладнання хімічної інженерії»:

у дисципліні ПО 12.2 Процеси та обладнання хімічної технології. Частина 2. Гідромеханічні та механічні процеси;

під час курсового проектування, дипломного проектування.

2. Здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти за освітньою програмою «Інжиніринг та комп'ютерно-інтегровані технології проектування інноваційного галузевого обладнання»:

у дисципліні ПО4 Інжиніринг інноваційних технологій та обладнання;

під час курсового проектування, та виконання магістерської дисертації.

3. Здобувачів третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти за освітньо-науковою програмою «Галузеве машинобудування»:

у дисципліні ЗО 5 Перспективні напрями розвитку енерго- та ресурсоефективних процесів, обладнання та технологій;

під час виконання дисертації доктора філософії.

Впровадження результатів НДР дозволяє здобувачам вищої освіти отримати знання про сучасні підходи до процесів теплової взаємодії об'єктів з довкіллям та підвищення їх енергоефективності на основі застосування інтелектуальних систем енергозбереження та ознайомитися з новітніми напрямками моделювання цих процесів.

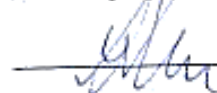
Зав. кафедри МАХНВ ІХФ,
к.т.н., доцент

 А.Р. Степанюк

Науковий керівник
кафедри МАХНВ ІХФ,
д.т.н., професор.

 А.М. Корнієнко

Зав. відділу ТДС ІТТФ НАН України,
д.т.н., професор

 О.М. Ободович

Зав. лабораторії теплофізичних основ
ДІВЕ, пр. наук. співробітник відділу ТДС
ІТТФ НАН України, к.т.н., с.н.с.

 Б.Я. Целень

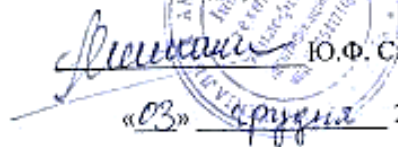
ЗАТВЕРДЖУЮ
Декан інженерно-хімічного факультету КПІ
ім. Ігоря Сікорського,
професор



Є.М. Панов

12 2024 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ
Директор інституту технічної теплофізики
НАН України,
академік НАН України



Ю.Ф. Сисажкін

«03» грудня 2024 р.

АКТ

Використання результатів дисертаційної роботи Целеня Богдана Ярославовича на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

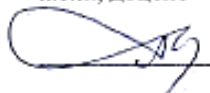
Дисертаційна робота Целеня Богдана Ярославовича на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук присвячена подальшому розвитку науково-практичних засад фізичних механізмів енергетичного впливу методу ДІВЕ на водні системи, а також розробленню на цій основі практичних шляхів підвищення ефективності промислових кавітаційних технологій водопідготовки та очищення води від шкідливих (агресивних) газів. В роботі обґрунтовано шляхи підвищення ефективності кавітаційних процесів для оброблення і очищення рідин. Зокрема розглядається процес кавітаційної дегаззації води і запропоновано удосконалену методику розрахунку гідродинамічних кавітаційних реакторів на базі сопла Вентурі та роторно-пульсаційних апаратів, що входить до удосконаленої математичної моделі процесу очищення рідини від сторонніх газів та органічних домішок. Модель враховує закономірності ізотермічного кавітаційного закипання рідини при скиданні зовнішнього тиску і описує утворення та еволюцію кавітаційного кластера парогазових бульбашок при проходженні потоку рідини через канал кавітаційного реактора.

Згідно договору про співпрацю 04 ПР від 05.04.2021 р. з метою удосконалення навчального процесу в навчальні дисципліни:

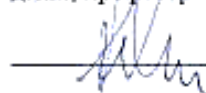
1. Здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти за освітньою програмою «Комп'ютерно-інтегровані технології проектування обладнання хімічної інженерії»;
 - у дисципліні ПО 12.2 Процеси та обладнання хімічної технології. Частина 2. Гідромеханічні та механічні процеси;
 - під час курсового проектування, дипломного проектування.
2. Здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти за освітньою програмою «Інжиніринг та комп'ютерно-інтегровані технології проектування інноваційного галузевого обладнання»;
 - у дисципліні ПО4 Інжиніринг інноваційних технологій та обладнання;
 - під час курсового проектування, та виконання магістерської дисертації.
3. Здобувачів третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти за освітньо-науковою програмою «Галузеве машинобудування»;
 - у дисципліні ЗО 5 Перспективні напрями розвитку енерго- та ресурсоефективних процесів, обладнання та технологій;
 - під час виконання дисертації доктора філософії.

Впровадження результатів НДР дозволяє здобувачам вищої освіти отримати знання про сучасні підходи до процесів теплової взаємодії об'єктів з довкіллям та підвищення їх енергоефективності на основі застосування інтелектуальних систем енергозбереження та ознайомитися з новітніми напрямками моделювання цих процесів.

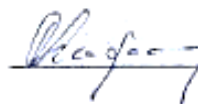
Зав. кафедри МАХНВ ІХФ,
к.т.н., доцент

 А.Р. Степанюк

Зав. відділу ТДС ІТТФ НАН України,
д.т.н., професор

 О.М. Ободович

Науковий керівник кафедри МАХНВ ІХФ,
д.т.н., професор

 Я.М. Корнієнко

Зав. лабораторії теплофізичних основ ДІВЕ,
пр. наук. співробітник відділу ТДС ІТТФ
НАН України, к.т.н., с.н.с.

 Б.Я. Целень